



**Otimização e simulação de sistemas de  
logística interna – caso real de definição  
de rotas *milk run* numa empresa de  
semicondutores**

**Tiago da Silva Santos**

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Américo Lopes de Azevedo

Co-orientador: Samuel de Oliveira Moniz

25 de Junho de 2018



# Resumo

A melhoria da eficiência operacional depende de um vasto número de decisões, sendo a redução de custos e atrasos associados aos sistemas de manuseamento de materiais, aspetos essenciais para obter níveis superiores de produtividade. Neste contexto, a abordagem *milk run* procura otimizar a movimentação de materiais, através de uma melhor definição de rotas e frequências de transporte.

Esta tese propõe uma abordagem híbrida de otimização e simulação, para desenhar um *milk run* numa empresa de semicondutores, a ser implementado através de um sistema de transporte automático de carga (AGV – *Automated Guided Vehicle*).

O modelo de otimização procura obter soluções ótimas das rotas em termos de custo total de operação. Enquanto o modelo de simulação centra-se na avaliação detalhada de vários cenários, estimando o impacto que o *milk run* tem em variáveis relevantes do sistema de produção, como o *output* de produção, *lead time* dos produtos, tamanho dos *buffers* de entrada e saída e a taxa de utilização dos AGVs. Neste trabalho, foi adotada a plataforma de otimização CPLEX, que foi combinada com o *software* de simulação - SIMIO.

Os resultados demonstram a importância da relação entre a otimização e simulação para obter soluções mais robustas e confiança no desenho da solução final. Por fim é possível extrair conclusões relativamente ao impacto do número de veículos e respetivas características no sistema de produção, ou seja, planos de produção tipicamente mais rápidos exigem mais veículos, contudo é possível contornar este investimento com a adaptação de veículos com melhores características.

**Palavras-chaves:** *milk run*, sistema automático de transporte materiais, otimização, simulação de eventos discretos, indústria de semicondutores.



# Abstract

Improving operational efficiency depends on a large number of decisions. Reducing the costs and delays associated with the material handling systems are essential for achieving higher levels of productivity. In this context, the milk run approach seeks to optimize the movement of materials, through a better definition of routes and frequencies of deliveries.

This thesis proposes a hybrid optimization and simulation approach to design a milk run in a semiconductor company, to be implemented through an Automated Guided Vehicle (AGV) system.

The optimization model attempt to obtain optimum route solutions in terms of total cost of operation. While the simulation model focuses on the detailed evaluation of various scenarios, estimating the impact that the milk run has on relevant variables of the production system, such as lead time of products, size of input and output buffers, and utilization rate of AGVs. In this work, the CPLEX optimization platform was adopted, which was combined with the simulation software - SIMIO.

The results demonstrate the importance of the relationship between optimization and simulation to obtain more robust solutions and confidence in the design of the final solution. Finally, it is possible to draw conclusions regarding the impact of the number of vehicles and their characteristics on the production system. Typically faster production plans require more vehicles, however it is possible to prevent this investment by adapting the vehicles with better features.

**Keywords:** in-plant milk run, automated material handling system, optimization, discrete event simulation, semiconductor manufacturing.



# Agradecimentos

Esta tese tornou-se uma realidade com o apoio e a ajuda de pessoas aos quais gostaria de estender os meus mais sinceros agradecimentos.

Ao Professor Américo Lopes de Azevedo, que como professor e orientador, foi uma influência no meu percurso académico e na minha especialização em gestão industrial.

Ao Professor Samuel de Oliveira Moniz, meu co-orientador, uma gratidão especial, por todo o conhecimento que transmitiu, pelas opiniões e colaboração no solucionar de problemas e no pensamento crítico sobre resultados.

Ao Ruben Dias pela ajuda e disponibilidade com as suas notáveis competências em simulação e ao João Basto por partilhar os seus extraordinários conhecimentos. Meu muito obrigado pela paciência que sempre demonstraram.

Desse modo, fico agradecido ao INESC TEC, em especial ao CESE (*Centre Enterprise Systems Engineering*), por me proporcionar as melhores condições no decorrer de toda a investigação.

Um reconhecimento especial à minha família, nomeadamente aos meus pais, irmã e avó por sempre acreditarem em mim e terem as melhores palavras de apoio. Sem dúvida, são modelos de coragem e o exemplo de uma família unida.

Por fim, à Catarina por ser o meu braço direito. Nos momentos mais difíceis, que não foram raros, demonstrou apoio incondicional, paciência e total ajuda na superação dos obstáculos. E claro, por apresentar sempre um sorriso e incentivando-me a ser cada dia mais e melhor.

Tiago da Silva Santos





*“However difficult life may seem,  
there is always something you can do and succeed at.”*

Stephen Hawking (1942 - 2018)



# Conteúdo

<b>Resumo</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Agradecimentos</b>	<b>v</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xv</b>
<b>Acrónimos e Abreviaturas</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Contexto . . . . .	1
1.2 Motivação . . . . .	2
1.3 Objetivos . . . . .	3
1.4 Metodologia . . . . .	4
1.5 Estrutura da dissertação . . . . .	5
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	<b>7</b>
2.1 <i>Toyota Production System</i> . . . . .	7
2.1.1 <i>Just-in-time</i> . . . . .	8
2.2 Sistema de produção na indústria de semicondutores . . . . .	9
2.3 Controlo de <i>stock</i> . . . . .	10
2.3.1 Conceitos de <i>stock</i> . . . . .	11
2.3.2 Ponto de encomenda . . . . .	12
2.4 Gestão de Logística . . . . .	12
2.4.1 Sumário . . . . .	13
2.5 <i>Milk run</i> . . . . .	14
2.5.1 Situações não aconselháveis para <i>milk run</i> . . . . .	16
2.5.2 Utilização de <i>milk run</i> em estações remotas . . . . .	16
2.6 <i>Material Handling Systems</i> . . . . .	18
2.6.1 <i>Mizusumashi</i> . . . . .	19
2.6.2 <i>Automated Guided Vehicle</i> . . . . .	19
2.7 Otimização do <i>Material Handling System</i> . . . . .	23
2.7.1 Otimização de MHS e <i>design</i> do <i>layout</i> . . . . .	23
2.8 Simulação . . . . .	25
2.8.1 Simulação do <i>layout</i> da instalação . . . . .	26
2.8.2 Simulação do MHS . . . . .	26

2.8.3	Dificuldades na simulação de sistemas de fabrico e MHS . . . . .	27
2.9	Otimização e simulação . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>31</b>
3.1	Descrição do problema . . . . .	31
3.2	Modelação do <i>layout</i> . . . . .	31
3.2.1	Características das zonas . . . . .	32
3.2.2	Tempos de processamento . . . . .	34
3.3	Definição das rotas . . . . .	35
3.3.1	CrITÉrios . . . . .	35
3.3.2	Múltiplas rotas . . . . .	35
3.4	Ciclo <i>milk run</i> . . . . .	37
3.5	Características dos veículos . . . . .	37
3.6	Otimização e simulação . . . . .	38
3.7	Modelo de otimização . . . . .	38
3.7.1	Formulação matemática . . . . .	39
3.7.2	Restrições . . . . .	40
3.7.3	Função objetivo . . . . .	41
3.8	Modelo de simulação . . . . .	41
3.8.1	Simulação das zonas . . . . .	41
3.8.2	Simulação dos AGVs . . . . .	42
3.8.3	Simulação dos produtos . . . . .	43
3.8.4	Simulação de falhas . . . . .	44
3.8.5	Experiências de simulação . . . . .	44
<b>4</b>	<b>Implementação da metodologia</b>	<b>47</b>
4.1	Caso de estudo . . . . .	47
4.1.1	Apresentação do <i>layout</i> . . . . .	47
4.1.2	Apresentação dos equipamentos . . . . .	49
4.1.3	Apresentação dos produtos . . . . .	50
4.1.4	Planos de produção . . . . .	51
4.1.5	Capacidades de produção . . . . .	52
4.2	Otimização . . . . .	54
4.2.1	Desenho dos cenários . . . . .	54
4.2.2	Parâmetros de otimização . . . . .	60
4.2.3	Índices $i$ . . . . .	60
4.2.4	Índices $r$ . . . . .	61
4.2.5	Resultados da otimização . . . . .	61
4.3	Simulação . . . . .	62
4.3.1	<i>Output</i> máximo . . . . .	62
4.4	Resultados . . . . .	64
4.4.1	Plano de produção 1 . . . . .	64
4.4.2	Sensibilidade a diferentes parâmetros . . . . .	66
4.4.3	Plano de produção 2, 3, 4 e 5 . . . . .	67
4.5	<i>Dashboards</i> . . . . .	70
4.5.1	<i>Lead time</i> . . . . .	70
4.5.2	WIP Global . . . . .	71
4.5.3	Taxa de utilização dos veículos . . . . .	73

<b>5</b>	<b>Conclusões e Trabalho Futuro</b>	<b>75</b>
5.1	Contribuições . . . . .	75
5.2	Trabalho Futuro . . . . .	77
	<b>Referências</b>	<b>79</b>



# Lista de Figuras

1.1	Modelo de planeamento do projeto. . . . .	5
2.1	Estrutura TPS, adaptado de [1]. . . . .	8
2.2	Sistemas de produção <i>pull</i> e <i>push</i> , adaptado de [1, 2]. . . . .	9
2.3	BOM e os produtos com procura independente ou dependente, adaptado de [3]. . . . .	11
2.4	O ponto de encomenda - ROP ( <i>reorder point</i> ) baseado numa distribuição normal da procura, adaptado de [4]. . . . .	12
2.5	Abordagem tradicional - modelo <i>hub</i> - <i>versus</i> sistema de fornecimento <i>milk run</i> , adaptado de [5]. . . . .	15
2.6	Níveis de inventário com o modelo <i>hub versus milk run</i> , adaptado de [5]. . . . .	15
2.7	Utilização de um armazém local, adaptado de [5]. . . . .	17
2.8	Aglomerado de fornecedores distantes do cliente, adaptado de [5]. . . . .	17
2.9	Implementação de um <i>crossdock</i> próximo dos fornecedores, adaptado de [5]. . . . .	18
2.10	Rota tradicional do <i>Mizusumashi</i> , adaptado de [6]. . . . .	20
2.11	<i>Workflow</i> do <i>Mizusumashi</i> , adaptado de [6]. . . . .	21
2.12	Classificação dos sistemas de distribuição <i>milk run</i> , adaptado de [7]. . . . .	24
2.13	Combinação otimização-simulação, adaptado de [8]. . . . .	29
3.1	Distribuição da planta de fábrica em diferentes zonas. . . . .	32
3.2	<i>Buffers</i> de entrada e saída de uma zona. . . . .	33
3.3	Aplicação da Lei de Little para cálculo do WIP máximo de cada zona. . . . .	33
3.4	Exemplo da definição de quatro possíveis rotas. . . . .	35
3.5	Representação de duas rotas <i>milk run</i> no interior da planta de fábrica. . . . .	36
3.6	Zona de acoplamento entre duas rotas. Em ambos os percursos, os veículos atravessam primeiro o <i>buffer</i> de entrada seguido pelo <i>buffer</i> de saída. . . . .	37
3.7	Ilustração de uma zona no <i>software</i> de simulação SIMIO. . . . .	42
3.8	Ilustração do AGV em simulação. . . . .	42
3.9	Ilustração dos produtos em simulação. . . . .	43
3.10	Distribuição triangular nos tempos de processamento. . . . .	44
4.1	<i>Layout</i> da área de produção da empresa de semicondutores. . . . .	47
4.2	<i>Layout</i> do sistema de produção agrupado em zonas de processamento. . . . .	48
4.3	Metodologia para o cálculo do WIP de cada zona. . . . .	52
4.4	Cenário 1.1. . . . .	54
4.5	Cenário 1.2. . . . .	55
4.6	Cenário 2.1. . . . .	55
4.7	Cenário 2.2. . . . .	56
4.8	Cenário 2.3. . . . .	56
4.9	Cenário 3.1. . . . .	57

4.10	Cenário 3.2. . . . .	57
4.11	Cenário 3.3. . . . .	58
4.12	Cenário 4.1. . . . .	58
4.13	Cenário 4.2. . . . .	59
4.14	Caracterização do $R_{in}$ e do $R_{out}$ no sistema. . . . .	63
4.15	Evolução do WIP no sistema no plano 1 com cadência de entrada de 332 min/FOUP. . . . .	63
4.16	<i>Output</i> do plano de produção 1. . . . .	64
4.17	WIP médio do plano de produção 1. . . . .	65
4.18	<i>Lead time</i> do plano de produção 1. . . . .	65
4.19	<i>Output</i> do plano de produção 1 com velocidade 0,5 m/s. . . . .	66
4.20	<i>Output</i> do plano de produção 1 com tempo de <i>un-loading</i> de 50 segundos. . . . .	67
4.21	<i>Output</i> do plano de produção 2. . . . .	68
4.22	<i>Output</i> do plano de produção 5. . . . .	68
4.23	<i>Output</i> do plano de produção 3. . . . .	69
4.24	<i>Output</i> do plano de produção 4. . . . .	69
4.25	<i>Leat time</i> dos produtos no plano 1, Rota 2, capacidade 3 e 0 min tempo de ciclo. . . . .	70
4.26	<i>Leat time</i> dos produtos no plano 1, Rota 4, capacidade 1 e 0 min tempo de ciclo. . . . .	71
4.27	WIP dos produtos no plano 1, Rota 2, capacidade 3 e 0 min tempo de ciclo. . . . .	72
4.28	WIP dos produtos no plano 1, Rota 4, capacidade 1 e 0 min tempo de ciclo. . . . .	72
4.29	Taxa de utilização dos AGVs no plano 1, Rota 2, capacidade 3 e 0 min tempo de ciclo. . . . .	73
4.30	Taxa de utilização dos AGVs no plano 1, Rota 4, capacidade 1 e 0 min tempo de ciclo. . . . .	73



# Lista de Tabelas

3.1	Sequências de produção com referência às máquinas e respectivos tempo de processamento. . . . .	34
3.2	Sequências de produção com referência às zonas e respectivos tempos de processamento. . . . .	34
3.3	Estados dos AGVs . . . . .	38
3.4	Duração das baterias e tempo de carregamento. . . . .	38
3.5	Tabela exemplo a anexar no modelo de simulação que define para cada zona a sua capacidade. . . . .	41
3.6	Características dos AGVs. . . . .	42
3.7	<i>Part Mix</i> , sequência de produção por zonas e tempo de processamento. . . . .	43
3.8	Combinação de parâmetros para as experiências de simulação. . . . .	45
4.1	Listagem dos equipamentos contidos em cada zona. . . . .	49
4.2	Características dos produtos. . . . .	50
4.3	Planos de produção. Valores em quantidade de <i>wafers</i> . . . . .	51
4.4	Fluxos de materiais entre as zonas de produção. . . . .	53
4.5	Fluxos com maior intensidade. . . . .	54
4.6	Listagem dos parâmetros para otimização. . . . .	60
4.7	Índices <i>i</i> do modelo de otimização. . . . .	60
4.8	Índices <i>r</i> do modelo de simulação. . . . .	61
4.9	Cenário ideal para cada número de rotas. . . . .	61
4.10	Parâmetros do AGV para obter o <i>output</i> máximo do sistema. . . . .	62
4.11	<i>Output</i> máximo para cada plano de produção e respetiva cadência de entrada. . .	63



# Acrónimos e Abreviaturas

AGV	<i>Automated Guided Vehicle</i>
AMHS	<i>Automated Material Handling System</i>
BOM	<i>Bill of Materials</i>
FIFO	<i>First-in-First-Out</i>
FOUP	<i>Front Opening Unified Pod</i>
FTL	<i>Full Truck Loads</i>
JIT	<i>Just-in-time</i>
LT	<i>Lead Time</i>
LTL	<i>Less Than Truck Loads</i>
MHS	<i>Material Handling System</i>
ROP	<i>Reorder point</i>
TP	<i>Throughput</i>
TPS	<i>Toyota Production System</i>
VRP	<i>Vehicle Routing Problems</i>
WIP	<i>Work in progress</i>



# Capítulo 1

## Introdução

Neste capítulo introdutório, será providenciado um contexto do trabalho (ver capítulo 1.1). De seguida, a importância e motivação desta investigação em aspetos científicos e industriais (ver capítulo 1.2) e, consequentemente, o problema base é identificado, bem como os principais objetivos da dissertação (ver capítulo 1.3).

É ainda apresentada a metodologia adotada e a respetiva abordagem científica seguida neste trabalho de investigação (ver capítulo 1.4).

Por fim (ver capítulo 1.5), e de modo a concluir este capítulo inicial, a estrutura da dissertação é exposta, mencionando os temas e aspetos nos quais os restantes capítulos irão incidir.

### 1.1 Contexto

Mais do que nunca, o contexto da economia global exige das empresas elevados níveis de eficiência e competitividade - “Um ano sem melhorar é um ano ganho pela concorrência” [9]. De forma a colmatar este paradigma, as empresas debruçam-se sobre uma necessidade de melhoria contínua, sendo este um objetivo permanente, não se retendo apenas a fazer bem, mas sim ambiçionando um estado de evolução constante dos indicadores de produtividade e qualidade.

Num contexto industrial, a “qualidade” assume-se assim como um conceito incerto e nem sempre de imediata quantificação. Embora fortuitamente seja considerado como um atributo intrínseco aos produtos e serviços, a sua definição reside no grau de satisfação despertado pelos mesmos junto do cliente e a forma como as suas necessidades são supridas pelos requisitos oferecidos [9].

De forma a manter a satisfação dos clientes e a melhoria dos processos, o sistema de produção não se restringe apenas à conceção dos produtos físicos. A inconstante procura dos consumidores, a natureza dos produtos, a economia global e a economia da cadeia de abastecimento provocaram uma alteração na metodologia e no modelo de processos de negócio [10]. Enquanto isso, a fronteira que separa os fabricantes dos consumidores é gradualmente mais permeável, sendo os primeiros obrigados a aumentar a taxa de resposta aos pedidos, produzindo de acordo com as encomendas e não para *stock* [9].

Na era moderna, tecnológica e industrial são destacadas as melhorias na planta de fabrico, sendo o *layout*<sup>1</sup> da empresa uma combinação dinâmica de instalações necessárias para a produção de bens ou a entrega de serviços. Geralmente, as empresas lidam com problemas relacionados com a localização dos equipamentos e dos sistemas de manuseamento dos materiais (MHS-*Material Handling System*) [11]. O MHS é essencial na definição dos métodos de produção uma vez que, quando devidamente aplicado, potencia a eliminação de desperdícios<sup>2</sup> e regula o *lead time*.

Assim, a implementação de um sistema de veículos autónomos (AGV-*Automated Guided Vehicle*) num ambiente fabril proporciona a redução de custos significativos, aumentando o desempenho dos processos. Estes veículos não tripulados são usados no transporte de cargas, independentemente do tamanho, de um determinado local para outro definindo uma rota. Um sistema de controlo é responsável pela regulação do tráfego em situações em que se utilizam mais do que um veículo [13].

O *milk run* é um dos principais conceitos de transporte utilizados na indústria japonesa. Esta abordagem seleciona um transporte apropriado para cada fornecedor de componentes com uma frequência definida e projeta as respetivas rotas *milk run* [14]. Apesar de existir um vasto número de estudos relacionados com a logística de *milk run* entre instalações fabris, a sua investigação em ambientes de planta de fábrica ainda está bastante precoce [7].

## 1.2 Motivação

Através do desenvolvimento da automação, robótica e de sistemas de fabrico avançados, as organizações aumentaram os seus níveis de economia para lucros elevados. A tecnologia é uma das razões para esse ressurgimento. O número de robôs industriais está a aumentar e, a par disso, tornam-se cada vez mais sofisticados e aptos na execução de tarefas mais complexas [15].

Os robôs industriais têm sido historicamente utilizados principalmente em tarefas que requerem força, trabalhando em condições desafiadoras com a máxima precisão e segurança que a maioria dos humanos provavelmente não conseguiria, por exemplo: movimentos periódicos, transporte de mercadoria pesada, soldagem e produção de semicondutores. Exigem um investimento e uma programação adequada e devem ser implementados com as devidas condições de segurança [13, 16].

Até recentemente, os baixos custos de mão-de-obra, além do alto preço dos robôs industriais, pouco incentivaram os países de baixos salários a investir na automação, todavia, com a valorização salarial e uma nova geração robotizada, mais económica, robusta e flexível, a equação foi se ajustando [17].

Debruçando-nos na indústria de semicondutores, a competição neste setor torna-se substancialmente mais intensa, assim, potenciais melhorias a nível de *layout* e do MHS desempenham

---

<sup>1</sup>*Layout* – corresponde ao esquema, *design*, projeção e distribuição da planta da fábrica. Demonstra a estrutura física e engloba elementos como células de fabrico, máquinas, ferramentas, corredores e áreas de armazenamento. O desempenho de qualquer trabalho é fortemente afetado pela distribuição desses mesmos equipamentos.

<sup>2</sup>Segundo Taiichi Ohno [12], "desperdício" é tudo que não acrescenta valor ao produto, ou seja, "qualquer atividade que o cliente não está disposto a pagar".

um papel decisivo nesta temática. De fato, já não é prático o operário transportar os lotes de *wafers*, que tipicamente consistem em 12-25 *wafers* num recipiente fechado, denominado por FOUP (*Front opening unified pod*). A sensibilidade deste tipo de produtos, a irregularidade dos trabalhadores e a rotina das rotas que exercem, incentivou a que nos últimos anos investigadores propusessem aproximações analíticas endereçadas ao *design* e controlo de AMHS (*Automated Material Handling System*) nas indústrias de semicondutores [18].

Não é incomum que aproximadamente 85% do tempo total que um produto demora a atravessar um sistema seja dedicado ao seu transporte ou à espera do mesmo. Este WIP (*Work in progress*) representa um vasto investimento (mais de 80% dos custos de atividade de produção), e a sua redução e atrasos associados podem resultar numa apreciável limitação de custos [19, 20].

Os modelos de otimização e simulação atuais nas indústrias são bastantes complexos, que requerem tempo de desenvolvimento significativo e demoram a ser executados. A necessidade e a dependência do AMHS na indústria de semicondutores têm vindo a aumentar daí os modelos se tornarem robustos [18].

A otimização permite a elaboração de planeamentos agregados e adequados para uma gestão eficiente da produção e da logística.

A simulação, por sua vez pode ser usada para analisar sistemas que ainda não existem na realidade e permite prever o seu comportamento, sendo o método interessante para analisar a movimentação do AMHS (e das restantes operações produtivas) [18]. Não é apenas obtida a antecipação dos processos, mas também são avaliados diferentes cenários de melhoria nos sistemas atuais. Através da simulação, engenheiros e analistas consideraram valioso avaliar o impacto dos investimentos de capital em equipamentos e instalações físicas, como também concretizarem propostas de alterações no MHS e no *layout* atual [21].

## 1.3 Objetivos

O objetivo desta dissertação consiste em estudar o impacto na produtividade e na eficiência dos processos, da implementação de um sistema de AGVs numa empresa de semicondutores, segundo o conceito de transporte *milk run*.

Dado o presente desafio, e não nos restringindo apenas à otimização do número de robôs necessários ou das rotas de movimentação de materiais, procurar-se-á estudar os requisitos de capacidade de produção, nível de serviço e a sensibilidade aos diferentes parâmetros dos AGVs. Dessa forma, serão analisados o *output*, o *lead time* dos produtos no sistema e a formação do WIP como resultado do manuseamento dos FOUPs pelos AGVs.

Por último, é fulcral validar e verificar o projeto no sentido de avaliar se são cumpridas as necessidades de produção e a sustentabilidade do sistema.

## 1.4 Metodologia

Este trabalho seguiu uma metodologia híbrida de otimização-simulação para a resolução do problema de desenho de rotas de *milk run* (ver Figura 1.1).

Previamente à definição das rotas, é necessária uma análise do *layout* atual, das sequências de produção e dos fluxos de materiais entre as diferentes células de fabrico. Findo esta etapa, é possível, através de critérios heurísticos, desenhar alternativas de rotas para os AGVs.

Baseando-nos numa poderosa ferramenta de apoio à decisão (CPLEX), o modelo de otimização visa avaliar os diferentes cenários de rotas e obter uma solução ótima. A função objetivo propõe minimizar o número de veículos necessários e respetivos custos associados, ou seja, potenciar os benefícios de um sistema *milk run* no interior de uma planta de produção. O sistema de rotas será o principal parâmetro para o plano de simulação.

O modelo de simulação permite obter informações relevantes de todo o sistema de acordo com vários parâmetros, tais como: a variação da capacidade de transporte e velocidade dos AGVs, o tempo de ciclo das rotas *milk run* e o tempo de *un-loading* dos materiais. A simulação de eventos discretos é assim uma ferramenta valiosa na avaliação de sistemas de produção e prevê o desempenho de um sistema existente ou planeado, comparando as soluções alternativas. A utilização do SIMIO como ferramenta de simulação, permite-nos obter um modelo gráfico que descreve facilmente o sistema modelado bem como os resultados para análise.

Numa primeira instância são procuradas soluções de rotas ótimas em termos de custos de operação, seguida de uma fase de teste no qual os vários cenários são simulados e analisados. Este método híbrido pressupõe que o cenário de rota ideal fornecido pelo modelo de otimização possa não ser factível para o sistema (verificado na fase de simulação), daí a necessidade de se ajustar os parâmetros de entrada, nomeadamente, o número mínimo de veículos (rotas)<sup>3</sup>.

De forma a permitir um estudo e uma análise comparativa entre o número de rotas e o comportamento do sistema, serão extrapolados do modelo de otimização vários cenários com diferentes números de rotas e, em seguida, simulados, permitindo conclusões instantâneas sem a necessidade de após cada simulação retornar à otimização e limitar os parâmetros. Em suma, é evidente a abordagem híbrida e iterativa entre a otimização e a simulação, contudo, esta decorre de forma automática.

---

<sup>3</sup>Ao longo de toda a dissertação, o número de rotas corresponde ao número de veículos, visto que, a cada rota está associada apenas um veículo.



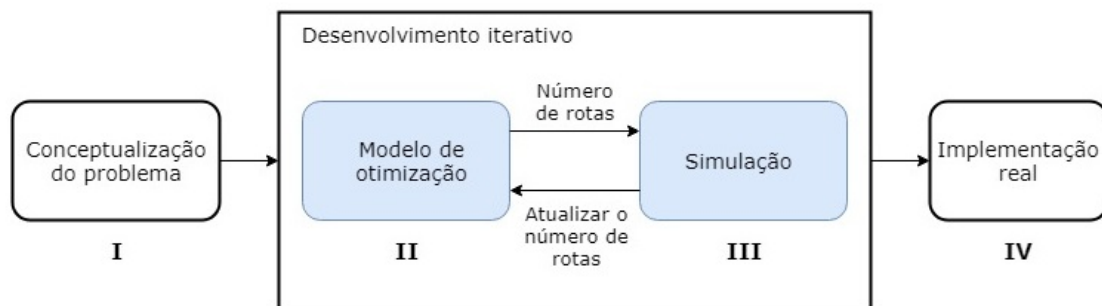


Figura 1.1: Modelo de planeamento do projeto.

## 1.5 Estrutura da dissertação

Este capítulo introdutório será seguido por uma revisão bibliográfica (ver capítulo 2) onde será fornecida uma temática global dos conceitos, técnicas e métodos utilizados para resolução do problema apresentado.

Posteriormente, a metodologia será exposta no capítulo 3. Em seguida, a apresentação do caso de estudo e os resultados de várias instâncias são apresentados e analisados (ver capítulo 4).

Por fim, a dissertação termina (ver capítulo 5) com o testemunho dos principais resultados e conclusões, bem como o trabalho futuro que poderia ser aplicado à abordagem proposta.

No decorrer de toda a dissertação foi adotado o sistema internacional de unidades e respetivas unidades derivadas.



## Capítulo 2

# Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta o *Toyota Production System* (TPS) e o seu enquadramento e relevância na contexto industrial, nomeadamente a influência de entregas JIT no *lead time* dos sistemas (ver capítulo 2.1). No capítulo 2.2 é descrito o contexto e as características da indústria de semicondutores e a produção de *wafers*.

No capítulo 2.3 são descritos os principais conceitos e modelos de controlo de inventário e WIP e no capítulo 2.4 são apresentados os conceitos base de gestão logística de transportes.

É ainda aprofundado o método de transporte *milk run* (ver capítulo 2.5), em particular no que diz respeito ao conceito e as suas variantes. A análise dos trabalhos relevantes na área de MHSs é feita no capítulo 2.6.

Por fim, são expostos os métodos de otimização a nível de ambiente de fábrica e manuseamento de materiais (ver capítulo 2.7), a importância e os conceitos da simulação (ver capítulo 2.8) e a abordagem híbrida entre otimização e simulação (ver capítulo 2.9).

### 2.1 *Toyota Production System*

Mais do que um conjunto de ferramentas, o TPS representa as elementos principais que definem a eficiência operacional de um sistema de produção (ver Figura 2.1). Todos os elementos do TPS interagem entre si com o mesmo propósito: i) aumentar a qualidade dos produtos; ii) reduzir custos; e iii) diminuir o *lead time*. O TPS foca-se também em aspetos relacionados com a segurança do sistema de produção e com aspetos organizacionais dos colaboradores.

De forma a alcançar uma redução de custos efetiva, Hines [22] definiu os três grandes objetivos do TPS, como sendo o:

- **controlo de qualidade** — permitir que o sistema se adapte às flutuações diárias e mensais da procura a nível de quantidade e variedade;
- **garantia de qualidade** — cada processo é responsável por entregar os produtos de acordo com as conformidades às etapas subsequentes;

- **respeito pela humanidade** — deve ser promovida uma cultura de respeito e valorização dos recursos utilizados.

O TPS esta assente em cinco conceitos chave: *just-in-time* (JIT) - tudo deve ser produzido, transportado ou comprado na hora exata; *jidoka* – quando um erro ocorre, o equipamento deve parar imediatamente, prevenindo que produtos com não-conformidade sejam produzidos. Estes aspetos são implementados num ambiente regular e seguro: "*Heijunka*", "*Kaiken*" e "Normalização".

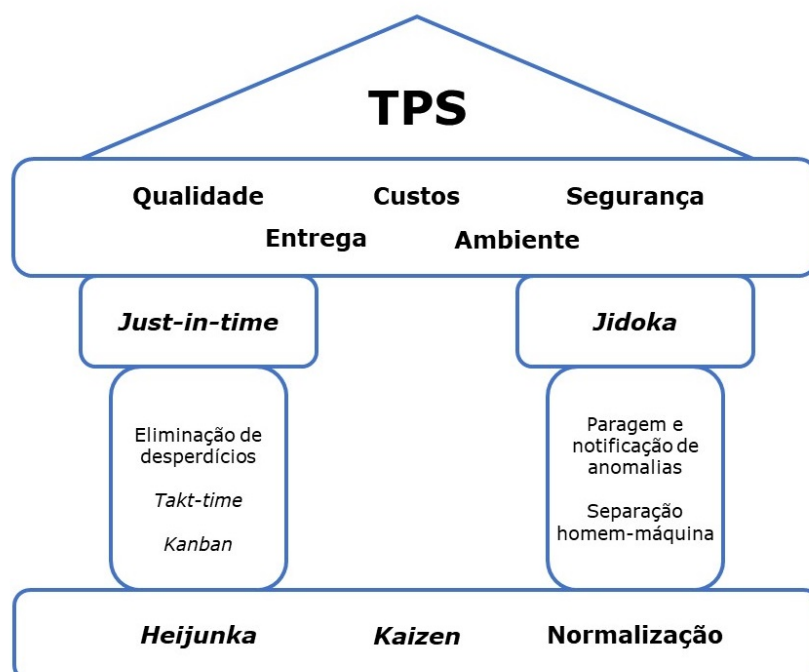


Figura 2.1: Estrutura TPS, adaptado de [1].

### 2.1.1 *Just-in-time*

Segundo Courtnois et al. [23] o objetivo principal do JIT consiste em eliminar todo o tipo de desperdícios de operações providenciando um nível zero de *stock*.

Como Dennis [24] explicou, a introdução à abordagem JIT é invocada pela necessidade de responder a problemas específicos, tais como: variedade de produtos em pequenas quantidades, forte concorrência e rápido desenvolvimento tecnológico. Produzir segundo esta filosofia requer operários especializados e equipamentos confiáveis e disponíveis, bem como a existência de um fluxo contínuo de materiais e informações.

De acordo com Tayal [25], a implementação do JIT fornece os seguintes benefícios:

- **tempo de *setup* reduzido** — permite que a empresa reduza os tempos de *changeover*<sup>1</sup>;
- **melhoria no fluxo de materiais do armazém para o ponto de entrega** — lotes pequenos ou individuais permitem que a empresa reduza o seu nível de *stock* e *WIP*;
- **diminuição do espaço de armazenamento.**

### 2.1.1.1 Sistema *Kanban*

O sistema *Kanban* desempenha um papel fundamental como método de controlo de produção. Também definido por "método do supermercado", a sua abordagem de funcionamento é assegurada através de cartões ("*The Kanban card*") visíveis, que identificam os componentes a produzir, conforme a necessidade.

O processo é baseado no princípio *pull* - com os produtos a serem requeridos apenas quando necessário ("*make-to-order*"), em oposição ao sistema *push* que não considera a necessidade atual de produção nem a procura ("*make-to-stock*") [1] (ver Figura 2.2). Se o *WIP* for um parâmetro a limitar no sistema de produção é necessário implementar o primeiro método [2].

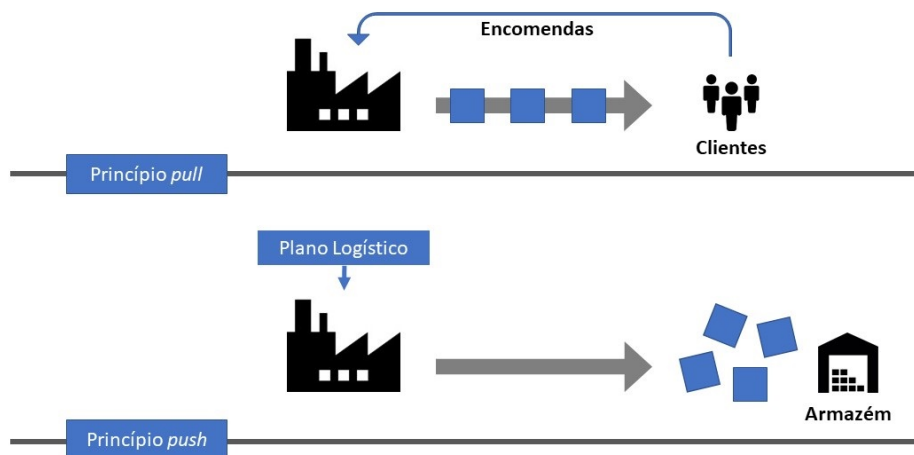


Figura 2.2: Sistemas de produção *pull* e *push*, adaptado de [1, 2].

## 2.2 Sistema de produção na indústria de semicondutores

Uma empresa de semicondutores (comummente nomeada por FAB), destaca-se dentro do contexto de uma economia globalizada pelo seu intenso dinamismo tecnológico. Estas são focadas no fabrico de dispositivos microeletrónicos, recorrendo a um sistema de produção de elevada complexidade.

<sup>1</sup>Tempo de *changeover* é o período de tempo requerido para preparar o equipamento, máquina ou processo desde que produziu o último produto do último lote até que dê início ao seguinte.

A produção de semicondutores, também denominados por circuitos integrados ou *chips*, requer a repetição em sequência de operações similares, tais como a fotolitografia, gravura, deposição de filmes, difusão, implantes iônicos e metalização, necessitando de um tempo de processamento rigoroso nas máquinas e células de fabrico. A produção é feita em *wafers* circulares de silício com diâmetros a variar entre 10 a 21 centímetros. Grupos de *wafers*, designados por lotes, seguem fluxos de produção bem definidos entre as máquinas [26, 27].

No seu artigo, Pierce e Stafford [27] referem que o sucesso da gestão de operações e controlo de produção nas empresas de semicondutores é criticamente dependente da disponibilidade e desempenho dos equipamentos. Contudo, acrescentam ainda que o manuseamento de materiais na planta de fabrico é fulcral para obter "níveis de produção de classe mundial".

Diversas instalações de semicondutores adotam o *layout job shop*<sup>2</sup> com vista a facilitar a instalação, manutenção e flexibilidade dos equipamentos para acomodar as mudanças dos processos [27].

A FAB, em condições ideais, pode produzir *wafers* em alguns dias. Contudo, fabricantes, que funcionam em regime 24/7, podem medir os tempos de ciclo em semanas ou mesmo meses. Estes tempos de ciclo longos são atributos de altos níveis de WIP e outras fontes de variabilidade, tais como problemas de qualidade, paragens não agendadas ou instabilidade dos processos [27].

Relativamente ao manuseamento de materiais, Pierce e Stafford [27] referem a realidade atual das FABs. Estas sentem-se reticentes quanto ao transporte de produtos por operários. Um MHS adequado previne reduções no rendimento causadas pela contaminação e vibração. Este fator conduziu a que várias empresas de semicondutores analisassem as perdas de rendimento e responsabilizassem a ruptura das *wafers* à incapacidade da manipulação manual.

## 2.3 Controlo de stock

O *stock* é definido como o conjunto de unidades de cada artigo que constitui determinada reserva aguardando satisfazer uma futura necessidade de consumo [28]. O conjunto de todos os artigos em *stock* de uma empresa constitui o seu *stock* global. Por sua vez, "consumo" refere-se à saída de unidades de um artigo de armazém ou à sua utilização final.

Segundo Sanders [3], para compreender o *stock* este deve ser separado em duas categorias: procura dependente e procura independente. A procura independente refere-se ao produto final, por outro lado, a dependente refere-se a componentes. A relação entre estas procuras é representada na BOM (*Bill of Materials*). Um exemplo é demonstrado na Figura 2.3. O item A é o produto independente e todos os restantes, dependentes.

---

<sup>2</sup>*Job shop* é o termo tipicamente utilizado para definir o sistema de manufatura que produz um elevado número de diferentes produtos, normalmente em pequenas quantidades e, frequentemente, de acordo com as especificações do cliente. Além disso, é também caracterizado pelas sequências de produção que variam em função do produto, assim como respetivos tempos de processamento.

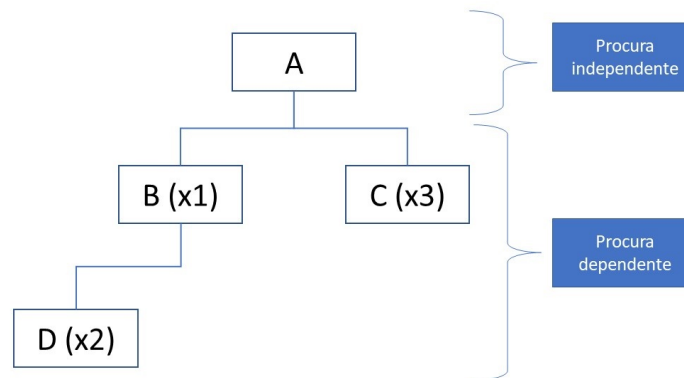


Figura 2.3: BOM e os produtos com procura independente ou dependente, adaptado de [3].

### 2.3.1 Conceitos de *stock*

Stevenson e Hojati [4] definem os tipos de *stock* que podem estar presentes na planta de fábrica:

- matéria prima e produtos adquiridos;
- produtos parcialmente finalizados, definidos por WIP;
- produtos finalizados em espera;
- material de reposição e ferramentas;
- produtos em trânsito para armazéns, áreas de produção ou inspeção.

O TPS e, na sua ideologia JIT, o objetivo providencia um nível zero de *stock*, contudo Stevenson e Hojati [4] enumeram várias funções do *stock*:

- antecipar a procura;
- suavizar os requisitos de produção;
- proteger contra ruturas de *stock*;
- beneficiar de descontos de quantidades.

Apesar das querelas entre a abordagem TPS e o autor, é necessário monitorizar o *stock* para atingir uma dualidade sustentável entre a satisfação de atendimento ao cliente e os custos de *stock* associados. A eficiência da gestão de *stock* é suportada por conhecimentos logísticos nomeadamente na estimativa dos custos de manutenção, custos de encomenda e custos de escassez, bem como conhecimentos dos *lead times* e uma previsão confiável da procura.

De forma a garantir o controlo sobre o *stock*, é necessário um sistema para contabilizar os

produtos, seja ele um sistema periódico, no qual é realizada uma contagem física dos produtos em intervalos cíclicos, ou, numa abordagem perpétua, o sistema mantém uma contínua informação que monitoriza os decorrentes níveis de cada produto.

### 2.3.2 Ponto de encomenda

O ponto de encomenda - ROP (ver Figura 2.4) alerta a necessidade de o *stock* ser reabastecido. Esse valor é determinado de acordo com a taxa da procura e produção, o *lead time*, variabilidade da procura e do *lead time* e do *stock* de segurança. O *stock* de segurança é uma medida de contingência para situações inesperadas tais como flutuações na procura ou nos tempos de viagem.

Definindo um intervalo fixo de reabastecimento, as encomendas são efetuadas em ciclos constantes, permitindo o controlo periódico de *stock* e reduz o risco de falhas de inventário, benéfico em sistemas de produção complexos cujos inventários são difíceis de monitorizar ininterruptamente. Contudo, essa abordagem requer um maior valor de *stock* de segurança, aumentando os custos de transporte e os custos de revisões periódicas.

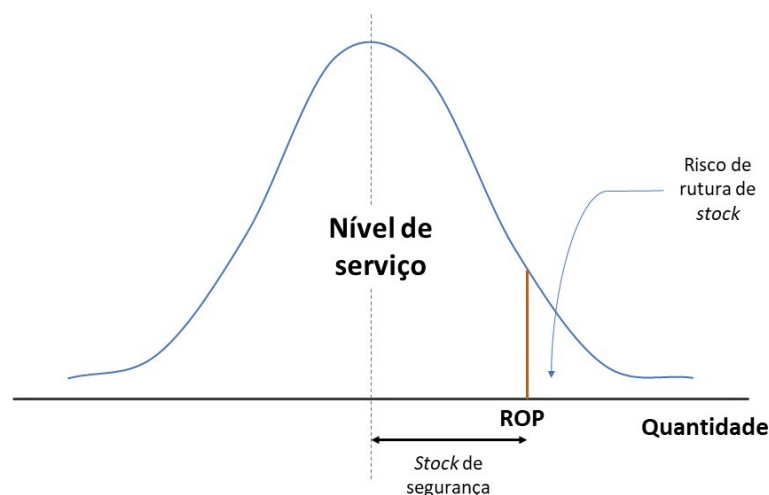


Figura 2.4: O ponto de encomenda - ROP (*reorder point*) baseado numa distribuição normal da procura, adaptado de [4].

## 2.4 Gestão de Logística

Meyer [14] definiu três conceitos predominantes de transporte nas instalações fabris:

- *Point-to-Point*;
- *Area forwarding services*;
- *Milk run*.



### ***Point-to-point***

No transporte *point-to-point*, os produtos/materiais são recolhidos pelo fornecedor e entregues diretamente ao cliente. Este conceito de transporte é recomendado para transações *full truck loads* (FTL), ou seja, segundo Meyer [14], cujo comprimento de carga alcance 11 metros. A duração do processo depende exclusivamente das distâncias entre os pontos.

Uma variação desse método é consolidada pelo *less than truck loads* (LTL) (carregamentos com menos de 11 metros), de um pequeno número de fornecedores vizinhos e transportar diretamente para a planta.

Em relação aos custos, estes dependem do volume e distância das entregas.

### ***Area forwarding services***

Nos serviços de encaminhamento de área, estes são agrupados, o fornecedor concede as ordens de transporte e a empresa subcontratada tem a responsabilidade de planejar e executar todos os transportes.

Os custos de transporte dependem do volume e distância entre o fornecedor e o local de entrega.

### ***Milk Run***

O *milk run* possibilita o “transporte de pequenas quantidades de um vasto número de diferentes produtos com um *lead time* previsível e sem aumentar os custos de transporte” [5]. Estes fornecimentos são repetidos ciclicamente de modo a que mais do que um fornecedor seja visitado. A ideia subjacente é reduzir a variabilidade dos processos e consequentemente, reduzir os níveis de *stock*.

Meyer [14] apresenta as características principais do *milk run*, sendo estas:

- rotas fixas com recolhas e tempos de entregas executados de acordo com um tempo de ciclo definido;
- no percurso os recipientes cheios e vazios são trocados numa proporção 1:1.

Por outro lado, Fink et al. [29] usam o termo *milk run* para descrever a consolidação de mais do que um fornecedor a uma rota de recolha de produtos, mas não associam nenhum tipo de frequência de transporte.

## **2.4.1 Sumário**

Os serviços de *point-to-point* e *area forwarding* são operacionalmente mais fáceis de implementar. O método *milk run* impõe a necessidade de modelos de suporte à decisão de modo a desenhar e controlar um sistema eficiente. Além disso, o *milk run* é frequentemente adotado em

situações em que a ligação dos fornecedores requer recolhas/entregas regulares.

De notar ainda que os conceitos i) *Point-to-point*; ii) *Area forwarding services*; iii) *Milk run* podem ser diretamente transportados para o interior da fábrica.

## 2.5 *Milk run*

Tal como analisado no capítulo 2.4, o fornecedor *milk run* permite o abastecimento de produtos provenientes de múltiplos fornecedores. O ciclo de funcionamento resume-se em inicializar a rota com contentores vazios, recolher o material nas estações em quantidades LTL, finalizando com transações FTL.

O conceito *milk run* pode ser comparado à filosofia de funcionamento do “comboio” (exemplo: intervalados de quatro horas, cada transporte inicia segundo uma rota fixa com as respetivas paragens estipuladas). O *milk run* caracteriza-se pelo seu levantamento programado de produtos em vários fornecedores para suportar um determinado nível de produção. Em contraste, o serviço “táxi” efetua as suas operações diretamente entre o porto de partida e o de chegada (*point-to-point*).

Estas duas abordagens podem ser analisadas pelo seu método de funcionamento na Figura 2.5. Na situação *point-to-point* são percorridos  $2 \times 50 + 4 \times 55 + 2 \times 50 = 420$  km/dia, enquanto que na situação *milk run* são considerados  $3 \times (10 + 10 + 50 + 50) = 360$  km/dia.

Sendo requerida apenas coordenação entre o cliente e cada fornecedor, o modelo *hub* é mais intuitivo de implementar, todavia e, apesar de ter em consideração todos os participantes da viagem, as vantagens do o sistema *milk run* justificam o esforço.

### Vantagem 1 - redução de inventário

A Figura 2.6 compara o impacto das duas abordagens no nível de inventário na planta de fabrico do cliente. O padrão dente-de-serra, com redução linear entre as entregas, representa o consumo constante da produção.

Pressupostos:

- Os fornecedores X, Y e Z enviam materiais para o mesmo cliente. A taxa de fornecimento de Y é o dobro de X e Z;
- O cliente consome os materiais a um ritmo constante;
- O mesmo camião é utilizado para os três fornecedores, de modo que, na abordagem *hub*, existe um escalonamento ao longo do dia.

Pode ser observado na Figura 2.6 que em situações *milk run*, os itens X e Z reduzem para 1/3 o nível de inventário e o item Y para 2/3. O autor considera que “sistemas *milk run* que envolvem 5 ou 6 fornecedores obtêm uma redução de inventário de 80% ou mais”.

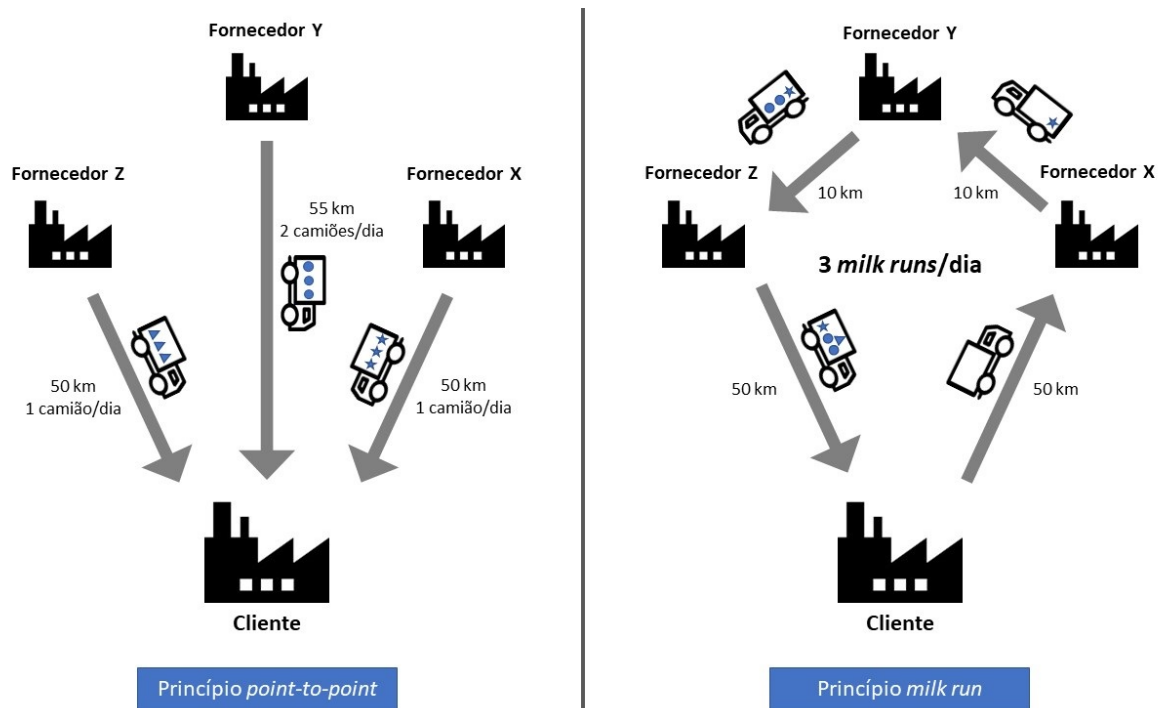


Figura 2.5: Abordagem tradicional - modelo *hub* - versus sistema de fornecimento *milk run*, adaptado de [5].

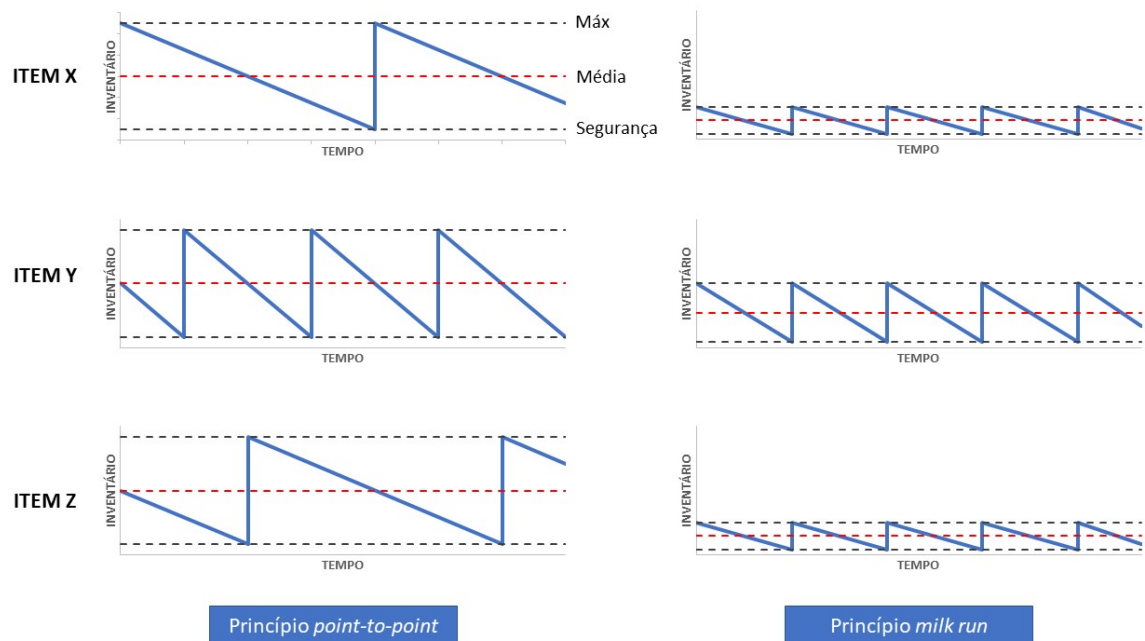


Figura 2.6: Níveis de inventário com o modelo *hub* versus *milk run*, adaptado de [5].

### **Vantagem 2 - Reabastecimento com *lead time* previsíveis**

O sistema de fornecimento *milk run* desempenha a função de um canal de transporte previsível. O planeamento regular define os períodos do dia no qual o transporte reabastece o cliente.

A Figura 2.6 analisa três produtos, no entanto, em situações reais, podem ser centenas ou milhares de produtos com diferentes frequências de fornecimento. Assim, o *milk run* reduz a complexidade em analisar cada produto individualmente bem como a redução dos respetivos custos de transporte.

Os materiais e componentes em *stock* devem ser abastecidos em quantidades largas o suficiente para suportar o consumo até à próxima entrega. A taxa de consumo é baseada na produção interna. Se houver um aumento da frequência de abastecimento, o nível de *stock* de segurança irá reduzir uma vez que o período de tempo para suportar o consumo dos materiais será menor.

### **Vantagem 3 - Beneficia a comunicação com os fornecedores**

A filosofia *milk run* promove uma visita regular aos fornecedores facilitando a comunicação relativamente às quantidades e periodicidades das entregas. A verificação dos produtos a transportar é uma vantagem que resulta destas visitas.

#### **2.5.1 Situações não aconselháveis para *milk run***

*Milk runs* são predominantemente usados em componentes com razoáveis frequências de transporte.

Seguindo estas circunstâncias, o conceito de *milk run* não deve ser aplicado nas seguintes situações:

- um componente é necessário em grandes quantidades ao longo do dia. Torna-se sensato dedicar um camião exclusivamente a essa função;
- um componente é necessário esporadicamente, em pequenas quantidades, logo, transportadores comuns são a abordagem recomendada;
- um fornecedor localiza-se geograficamente distante dos restantes. O custo de inserir esse fornecedor numa rota *milk run* pode não ser justificável.

#### **2.5.2 Utilização de *milk run* em estações remotas**

##### **2.5.2.1 Abordagem 1: Utilização de um armazém local**

A forma mais direta para estender o uso do *milk run* consiste em manter um armazém intermédio entre os fornecedores e o cliente tal como representado na Figura 2.7.

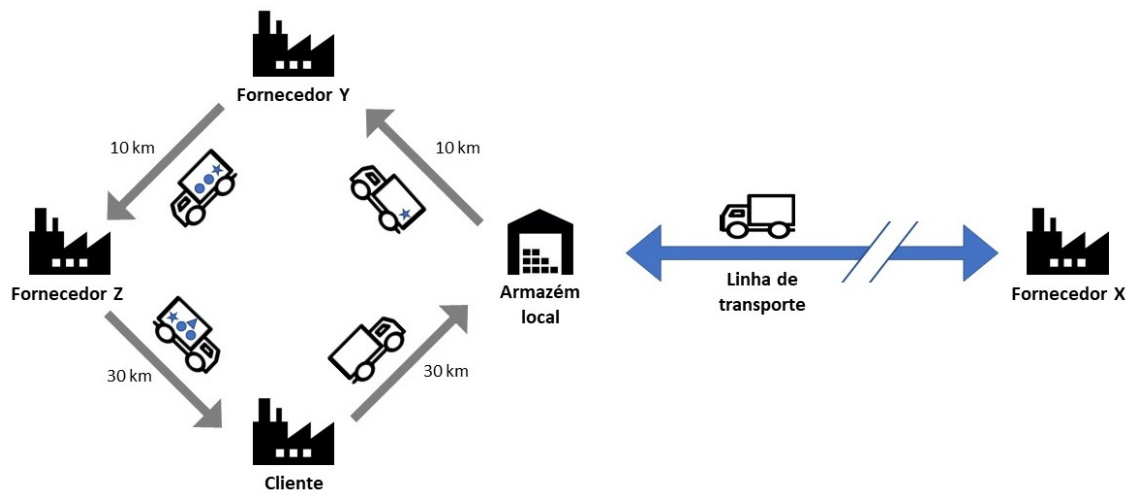


Figura 2.7: Utilização de um armazém local, adaptado de [5]

### 2.5.2.2 Abordagem 2: O *local-far milk run*

O conceito *milk run* pode ser estendido geograficamente quando existe um aglomerado de fornecedores próximos entre si, mas distantes do cliente. Os mesmos camiões realizam a uma linha de transporte entre o cliente e o aglomerado (Figura 2.8).

A principal limitação desta abordagem quando comparada com um *milk run* local consiste no tempo de inversão do camião que pode ser de vários dias. Esta limitação prejudica a transmissão de informações entre o cliente e os fornecedores no caso de transporte de cartões *Kanban*.

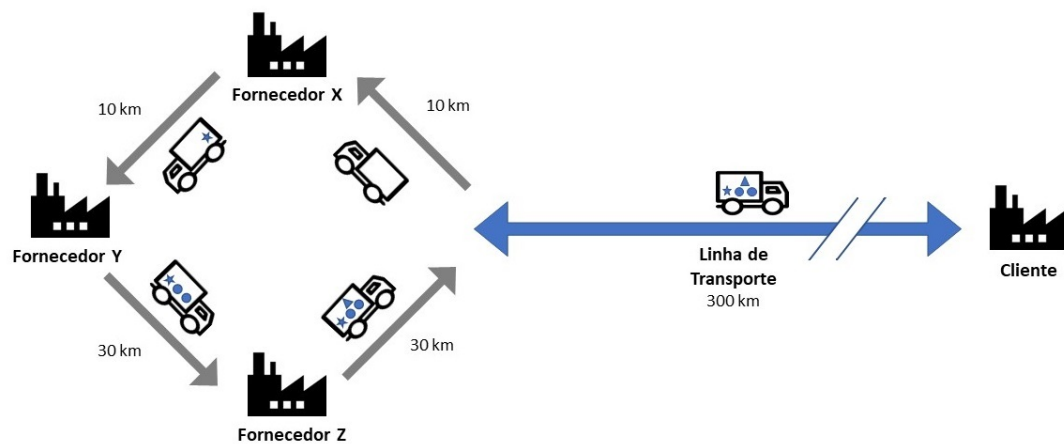


Figura 2.8: Aglomerado de fornecedores distantes do cliente, adaptado de [5].

### 2.5.2.3 Abordagem 3: *Milk run* locais com *crossdock* próximo dos fornecedores

A Figura 2.9 representa a terceira abordagem no qual vários *milk runs* fornecem um *crossdock*. Este conceito é aplicável em situações de vários aglomerados próximos entre si. Um *crossdock* é

uma instalação no qual a entrada de produtos é imediatamente agrupada e pronta a ser transportada.

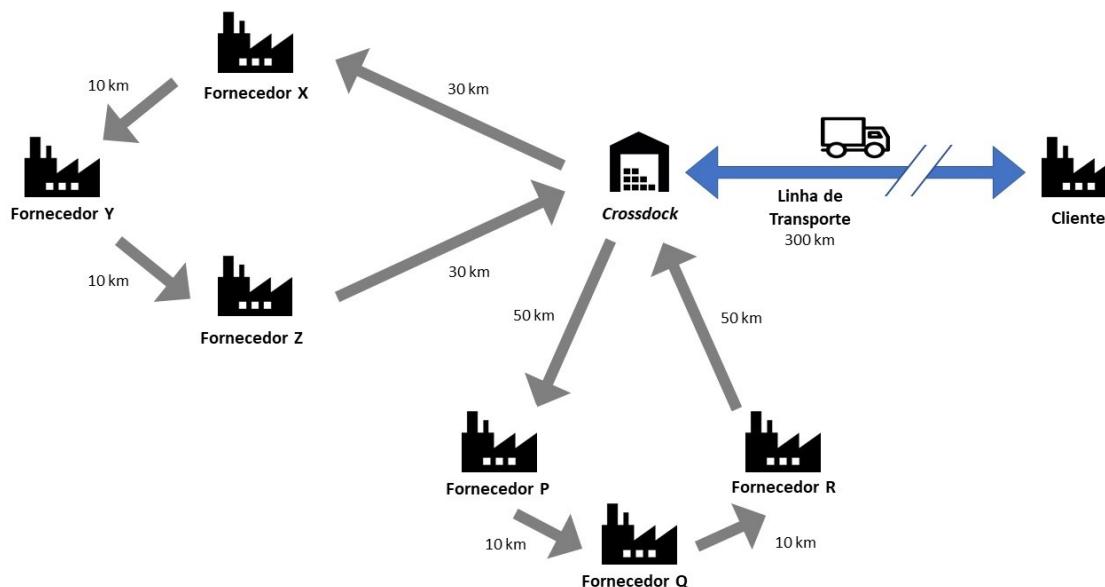


Figura 2.9: Implementação de um *crossdock* próximo dos fornecedores, adaptado de [5].

## 2.6 Material Handling Systems

Se o fornecimento de materiais na linha de produção for ineficiente, o processo de fabrico é quase sempre afetado [30]. As linhas de produção requerem um fornecimento adequado de peças. No seu artigo, Harrell et. al [31] classificam os MHS em sete categorias: *conveyors*, veículos industriais, armazenamentos automáticos, *carousels*, veículos autónomos (AGVs), guindastes e robôs.

Todavia, Banks et. al [19] agrupam estes sistemas apenas em: sistemas de armazenamento, *conveyors* e transportadores (*unconstrained vehicles* ou *guided vehicles*).

Os *conveyors* são dispositivos fixos que movem entidades de ponto-a-ponto, seguindo uma rota fixa com carregamentos, paragens ou pontos de processamento específicos. Estes podem ser acumulativos se a secção estiver em movimento contínuo ou não acumulativo no qual a paragem de um item causa a paragem da secção.

Os *unconstrained vehicles* (exemplo: empilhadores manuais) não são restritos às configurações da rede e podem escolher rotas alternativas. Em contraste, os *guided vehicles* (controlados por operadores ou autónomos) circulam por um caminho fixo com opções limitadas a nível de obstáculos e congestões.

Como Nomura e Takakuwa [6] definiram, os métodos para fornecimentos de peças podem ser classificados em duas categorias:

- **manual-based** — sistema no qual os trabalhadores fornecem as entidades com as mãos ou transportadoras manuais, conforme representado pelo sistema *Mizusumashi* (ver capítulo 2.6.1);
- **automated-based** — sistema recente com método de funcionamento automático que adota equipamentos de manuseio de materiais para transferir produtos entre processos e armazéns, como por exemplo, veículos guiados autonomamente (AGVs) (ver capítulo 2.6.2).

Numa filosofia de *layout* reconfigurável em indústrias que frequentemente alteram os tipos de produtos e métodos de produção, a abordagem manual é recomendada.

Os propósitos de executar uma análise de simulação são distintos. No sistema automatizado, os testes de simulação são frequentemente executados na fase de planeamento para determinar a configuração do sistema. Por outro lado, o sistema manual tipicamente aborda a simulação com intuito de executar as operações mais eficientemente, considerando as alterações no ambiente de produção [6].

Os seguintes tópicos, analisam com maior grau de detalhe estas duas categorias e as suas principais características.

### 2.6.1 *Mizusumashi*

Um *Mizusumashi* é um manipulador de materiais que abastece as linhas de produção, usando o conceito *Kanban*, *i.e.*, apenas os itens necessários nas respetivas quantidades e no devido tempo são fornecidos. Segundo Ichikawa [30], o trabalhador *Mizusumashi* afeta fortemente a produtividade geral da célula.

No seu artigo, Nomura e Takakuwa [6] definiram os dois métodos de fornecimento de materiais por *Mizusumashi*:

- **método da revisão periódica** — O *Mizusumashi* avalia a quantidade de WIP nas linhas de produção num ciclo de revisão periódica;
- **método da revisão contínua** — O intervalo de tempo para reabastecer e avaliar a quantidade de produtos ocorrem simultaneamente – o *Mizusumashi* verifica a quantidade que deve abastecer no próximo ciclo e abastece de acordo com dados recolhidos do ciclo anterior.

A rota típica do *Mizusumashi* é ilustrada na Figura 2.10. O *workflow* típico é demonstrado na Figura 2.11. Primeiro verifica o número de materiais e recolhe os contentores vazios. Prosseguindo, visita o armazém para os abastecer e retorna à linha de produção. Em ambas as situações, os retângulos e linhas a tracejado apenas são aplicados no método de revisão periódica.

### 2.6.2 *Automated Guided Vehicle*

Um sistema de AGVs corresponde a uma frota de veículos totalmente autónomos numa rede de rotas na planta de fábrica. Estes são responsáveis pelo transporte de produtos, sem intervenção

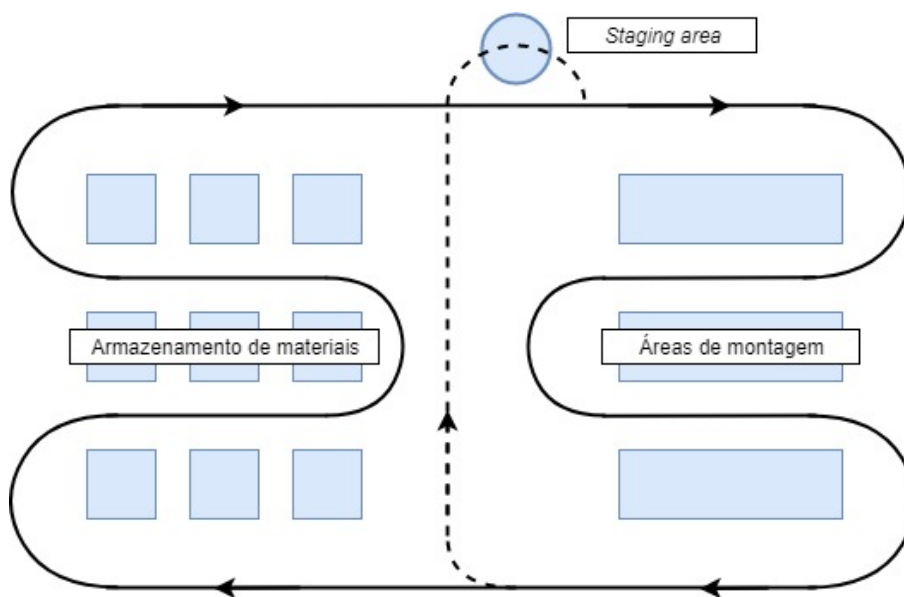


Figura 2.10: Rota tradicional do *Mizusumashi*, adaptado de [6].

humana, nas zonas de produção, armazenamento e distribuição, desempenhando um papel relevante na redução de custos e melhoria da eficiência dos processos.

Os veículos têm velocidades características que podem depender da carga a transportar, tempos de *loading* e *unloading* e locais específicos de paragem. Além disso, é necessária uma interrupção periódica para carregamento das baterias.

Os AGVs são controlados por um sistema central, a bordo ou uma combinação dos dois. O *software* integrado em cada veículo permite o controlo e navegação do mesmo. O sistema central responsabiliza-se pela gestão e atribuição de ordens de transporte à frota de veículos [31, 32]. Na sua modelação, o sistema é projetado para evitar tráfego e colisões através de rotas unidirecionais.

Segundo a Dematic [32], as condições ideais para implementar um sistema AGV são:

- transportes repetitivos;
- operações multi-turnos e 24/7;
- deslocações de longa distância;
- fluxos de produção complexos;
- transporte de e para armazéns e células de produção;
- transporte em ambientes desafiadores.

Atualmente são desenvolvidos métodos de modo a tornar os veículos mais suscetíveis a alocações dinâmicas e, paralelamente, evitar modificações consideráveis no *layout*. A navegação pode ser:



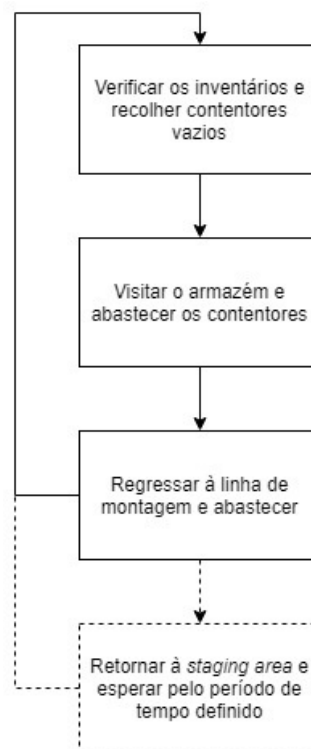


Figura 2.11: *Workflow* do *Mizusumashi*, adaptado de [6]

- **por fio** — é criada uma ranhura no solo com um fio. Este transmite sinal de rádio através do qual o AGV irá percorrer;
- **fita** — mesma filosofia que a situação anterior, mas, em contraste, as fitas são fixadas no solo e podem ser magnéticas ou coloridas;
- **navegação com laser** — exige a montagem de fita refletora em paredes ou postes. O AGV transporta um transmissor e recetor de laser numa torre rotativa;
- **navegação giroscópica** — um sistema de controlo computacional direciona e atribui tarefas aos veículos;
- **navegação por visão** — pode ser instalada sem alterações no ambiente ou na infraestrutura. Operam utilizando câmaras para registar recursos ao longo da rota;
- **geoguidance** — um AGV com este sistema reconhece o ambiente de trabalho e a sua localização atual. É capaz de detetar e identificar colunas e paredes no interior da planta de fabrico.

### 2.6.2.1 Soluções existentes

- **transporte em produção** — apresentam um transporte previsível e repetitivo de materiais entre o armazenamento e áreas de produção ou entre as próprias linhas de produção. Esta abordagem tem benefícios a nível de entregas JIT, redução de custos operacionais e danos nos produtos;
- **receção e distribuição** — transportam matéria-prima das áreas de receção para as linhas de produção e os produtos finalizados até à consolidação e envio.
- **armazenamento** — conduzem através de corredores estreitos e permitem armazenar cargas até vários metros de altura;
- **transporte fim de linha** — solução para automatizar o fluxo de produtos entre a produção e o envio. Os produtos finalizados são repetidamente danificados através do manuseio manual e este recurso permitem reduzir esses custos e melhorar a segurança.

### 2.6.2.2 Design do sistema AGV

Na fase de planeamento do sistema AGV, a primeira etapa é identificar todos os pontos de *pickup* e *drop-off*. Em seguida, a definição das rotas considerando vários aspetos:

- rotas unidireccionais numa filosofia de *loops*;
- pontos de paragem devem estar nas extremidades das células de produção;
- rotas cruzadas podem ser usadas se as reduções nos tempos de viagens forem significativas.

### 2.6.2.3 Controlo do sistema AGV

Uma frota constituída por mais do que um veículo pode tornar-se complexa e dispendiosa, sendo imperativo que o sistema seja gerido de forma a alcançar níveis de utilização e produtividade sustentáveis. Algumas das estratégias operacionais são discutidas em seguida.

- **regras de seleção de veículo** — se uma carga se encontrar pronta a ser transferida e mais do que um AGV estiver disponível, a seleção comum é a de *closest rule* no qual o veículo mais próximo é escolhido. Esta regra tende a evitar viagens longas sem carga. Outras regras de seleção podem ser:
  - o veículo menos utilizado;
  - o veículo que se encontra há mais tempo parado.
- **regras de seleção trabalho** — se um veículo ficar disponível e mais do que uma entidade aguarda para ser transferida, a decisão remete-se sobre a qual será movida em primeiro lugar. Algumas regras de decisão são definidas:

- cargas com maior tempo de espera;
  - cargas com menor tempo de espera;
  - cargas com maior prioridade;
  - maior número de cargas à espera numa localização.
- **regras de paragem dos veículos** — se um veículo entregar uma entidade e não houver mais em espera, a decisão será definir a ação do AGV:
    - manter a posição;
    - continuar para uma localização estratégica onde seja mais provável voltar a ser solicitado.

## 2.7 Otimização do *Material Handling System*

No ambiente competitivo de manufatura, é essencial a eliminação de processos que não agregam valor aos produtos. A movimentação de materiais é uma das atividades com maior desperdício no ambiente de fábrica, contudo é considerado parte integrante do *layout* da instalação e os seus objetivos são os seguintes [7]:

- aumentar a eficiência do fluxo de materiais com entregas JIT;
- diminuir os custos de manuseamento;
- melhorar a segurança e as condições de trabalho;
- facilitar o processo de fabrico;
- aumentar a produtividade.

As aplicações logísticas direcionadas a ambientes de produção *lean* são denominadas por logísticas *lean*, e agrupadas em três grupos, tais como: logística *in-bound* (do fornecedor para a fábrica), logística *in-plant* (logística interna, *i.e.*, no interior da fábrica) e logística *out-bound* (da fábrica para o cliente) [5]. O âmbito deste estudo consiste na logística *in-plant*.

### 2.7.1 Otimização de MHS e *design* do *layout*

O *design* de MHS está relacionado com problemas de roteamento de veículos (VRP-*Vehicle Routing Problems*). De certa forma, os VRP dentro das fábricas são similares aos VRP clássicos entre fábricas, sendo que continuam a existir entregas, carregamentos e capacidades dos veículos. Contudo, diferem dos problemas clássicos devido às suas propriedades típicas, dado que as quantidades exigidas pelos pontos de *stock* dependem das rotas que as abastecem, ou seja, as quantidades necessárias para os pontos de *stock* mudam de acordo com o ciclo periódico do veículo. O funcionamento das células de trabalho induzem outras divergências, tais como: o inventário que

depende do tempo de ciclo do veículo, as restrições físicas dos pontos de *stock* e da diversidade de produtos. Em consequência das diferenças mencionadas, é difícil aplicar um modelo *milk run* num ambiente interno de produção com os métodos de logística *in-bound* e *out-bound* [7].

Como o propósito da dissertação reside na logística interna, a literatura relacionada com logística *in-bound* e *out-bound* é omitida.

Os trabalhos no âmbito do MHS e do *layout* de instalações estão relacionadas. Esta dualidade prende-se ao facto de em ambos os casos o foco do estudo ter como objetivo minimizar o número de equipamentos para manuseamento de materiais e a sua adequada escolha com base nas características do *layout*.

Kilic et. al [7] classificaram os problemas de *milk run* em plantas de fábrica em três categorias (ver Figura 2.12). A primeira categoria, definida como “*General assignment problem*”, as rotas e os períodos de tempo são desconhecidos. A segunda categoria, “*Dedicated assignment problem*” ocorre em situações cujas células de produção ou pontos de *stock* são definidos previamente, ou seja, as rotas são conhecidas, mas é necessário determinar os períodos de tempo. Por fim, “*Determined time periods*”, os períodos de tempo são conhecidos, mas é necessário definir as rotas. Os autores desenvolveram modelos de otimização para a terceira categoria. Assumiram que o sistema de produção era do tipo *pull*, que o *layout* não sofria alterações, tal como a taxa de procura dos pontos de *stock*. O objetivo consistia em minimizar o número de veículos necessários e as respectivas distâncias percorridas. Concluíram que, apesar da dificuldade de gestão, múltiplas rotas *milk run* apresentam resultados mais benéficos em comparação com uma única rota.

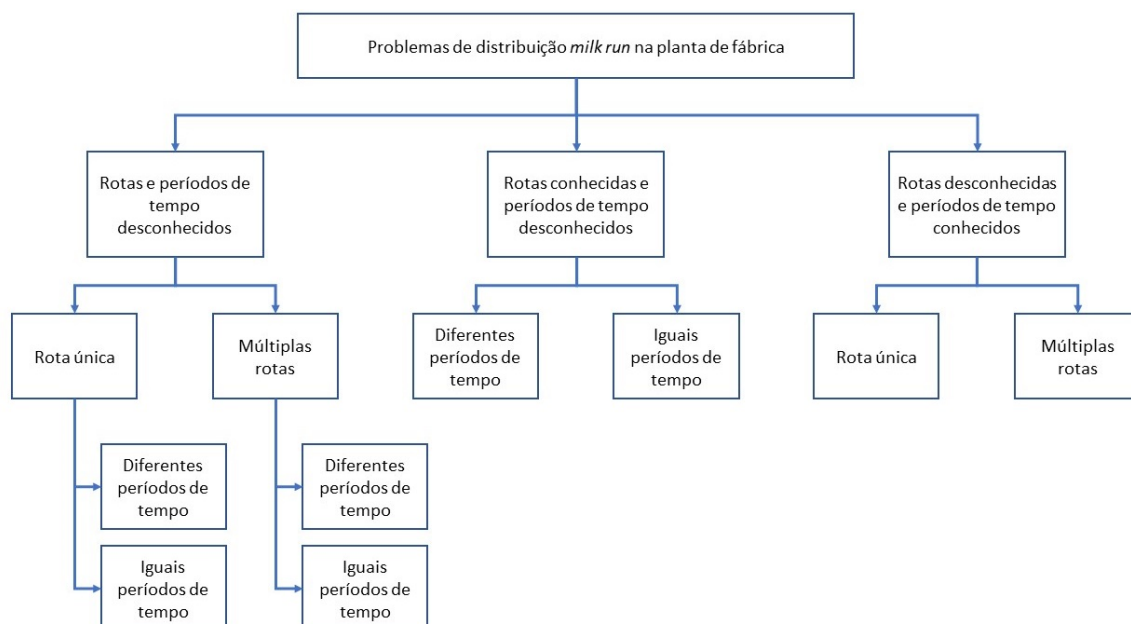


Figura 2.12: Classificação dos sistemas de distribuição *milk run*, adaptado de [7].

Rajagopalan e Heragu [33] apresentaram um estudo de problemas do *layout* de instalações e

no desenho de MHS, combinando o *design* do *layout* com a rede de fluxos de materiais. Sinriech e Samakh [34] desenvolveram uma meta heurística de entregas e carregamentos para um problema de MHS.

Hwang [35] aplicou um problema de roteamento de veículos na definição de um *layout* industrial de modo a determinar o número mínimo de viaturas necessárias. A sua abordagem agrupou um modelo heurístico integrado com o modelo de otimização de veículos devido à não-linearidade do problema.

Domingo et. al [36] propuseram um sistema de distribuição *milk run* para transporte de produtos numa linha de montagem capaz de resolver a acumulação de produtos em *stocks* intermédios. O objetivo da investigação foi baseado no princípio de produção *lean*, ou seja, o *milk run* permitiu reduzir inventário, transportes desnecessários e tempos de espera longos, sem alterar a filosofia de produção ou o *layout*. Os autores afirmam que as melhorias não são estáticas e que devem sofrer de melhoria contínua. Acrescentam que cada organização é diferente e é necessário adaptar o método de acordo com as características de produção, *layout*, inventário e fluxo de materiais.

Satoglu e Sahin [37] propuseram uma abordagem heurística e um modelo matemático não-linear para um sistema periódico de fornecimento de materiais baseado no sistema de distribuição *milk run*. O fornecimento de materiais ocorre de acordo com a filosofia JIT de um armazém central para várias células de uma linha de montagem. O objetivo do modelo matemático consiste em minimizar os custos totais de manuseamento e de inventário.

## 2.8 Simulação

Segundo Banks et. al [19], através de modelos de simulação é expectável obter medidas numéricas do desempenho operacional, tais como a taxa de produção de acordo com diferentes parâmetros, mas o maior benefício sustenta-se na perceção e compreensão do sistema em relação às operações desenvolvidas. A visualização através da animação e de gráficos permitem uma maior comunicação dos resultados.

O principal propósito da simulação de processos de fabrico é identificar problemas e quantificar a *performance*. Medidas comuns a serem avaliadas são:

- taxa de produção sob diferentes cargas (médias e de pico);
- tempo de ciclo do sistema;
- utilização dos recursos, mão-de-obra e máquinas;
- *bottlenecks*;
- filas de espera nos *buffers*;
- filas de espera e atrasos provocados pelos MHS;
- eficácia do plano de produção.

No seu artigo, Negahban e Smith [38] abordam a importância do *design* do sistema de produção na simulação e dividem esta classe em simulação *layout* da instalação e simulação do MHS. A simulação do MHS desempenha um papel fundamental devido ao seu grau de importância no sistema produção.

### 2.8.1 Simulação do *layout* da instalação

O desenho de *layouts* é um fator importante que afeta o desempenho dos sistemas de produção uma vez que lida com a alocação das máquinas e dos departamentos.

A simulação de eventos discretos é uma ferramenta apropriada para avaliar o *layout* atual, demonstrar possíveis abordagens de melhoria avaliando os respectivos desempenhos. Negahban e Smith [38] apresentam as várias pesquisas de simulação em diferentes problemas de *layout* de instalações.

### 2.8.2 Simulação do MHS

O *design* do MHS tem sido foco de vários estudos uma vez que parte dos custos totais de produção são devido ao manuseamento e transporte de materiais. Em consequência do aumento da complexidade desses sistemas, o que torna os modelos analíticos menos eficientes, a simulação de eventos discretos foi encontrada como uma ferramenta eficaz para resolver este tipo de problemas [38].

Com objetivo de aumentar a produtividade, a qualidade do produto e a flexibilidade do sistema, os veículos de transporte autônomos (AGV) têm sido frequentemente usados em ambientes de produção, especialmente em sistemas de manufatura flexíveis e fabrico de semicondutores. A modelação de sistemas AGV é altamente complexa devido aos altos níveis de aleatoriedade e ao grande número de variáveis envolvidas. Essa complexidade torna a simulação uma técnica extremamente útil na modelação desses sistemas. Hsueh [39] propõe um modelo de simulação de um sistema AGV com troca de carga entre dois veículos com intuito de eliminar conflitos e congestionamento. Nesse artigo também foi provada a necessidade desta abordagem em deslocações longas entre estações de trabalho.

Koo e Jang [40] apresentam modelos estocásticos do tempo de viagem dos veículos com ênfase no estudo da taxa de utilização dos veículos.

#### 2.8.2.1 MHS na produção de semicondutores

Os sistemas de produção de semicondutores caracterizam-se pelos seus ambientes altamente sofisticados, em consequência do vasto número de etapas de processamento e fluxos com reentrância. O planeamento da produção e do MHS é essencial, sendo a simulação de eventos discretos uma ferramenta candidata para estudar ambientes dinâmicos e complexos.

Em [41] são descritos métodos para classificar o nível de detalhe na simulação de sistemas de produção de semicondutores. Os autores definiram seis níveis de detalhe para a capacidade de produção e seis níveis para o AMHS. Estas classificações servem como base de uma estrutura para

selecionar os componentes do sistema a serem modelados dentro de um nível de detalhe desejado para planejar com precisão a capacidade dessas instalações.

Hoon Kong [42] introduz uma etapa adicional de simulação: a etapa de simulação do AMHS segue a etapa de simulação de produção, de modo a prever o comportamento da linha de produção de semicondutores e dimensionar o AMHS. Essa abordagem permitiu estimar o número de veículos requeridos e os tempos de entrega. Kiba et. al [43] descrevem uma nova estrutura de simulação para estimar a produtividade de uma fábrica de semicondutores antes da instalação de um AMHS. Os autores consideram que a total simulação da fábrica permite obter resultados completos e precisos do comportamento dos processos.

De acordo com Smith [44], a simulação provou ser uma ferramenta de análise flexível e útil no design de sistemas de produção e respectivas operações. No seu artigo, são descritas várias abordagens de outros autores no âmbito da simulação e refere a importância da evolução tecnológica permitir modelos mais robustos.

### 2.8.3 Dificuldades na simulação de sistemas de fabrico e MHS

Existem problemas cruciais na obtenção de resultados precisos e válidos. Uma dessas questões é a adequada modelação das inatividades e avarias e, por outro lado, a utilização de dados reais para simular essas mesmas falhas.

#### 2.8.3.1 Modelação de inatividades e avarias

Um modelo que não considere interrupções aleatórias pode ter um impacto importante no desempenho dos sistemas de produção. Se essas paragens forem consideradas, seja para manutenção preventiva ou um tempo de inatividade periódico, o modelo de simulação aproxima-se de uma situação real válida. Prever essas paralisações permite que sejam programadas de modo a atenuar o seu efeito no desempenho global.

Em [19] são enumeradas várias alternativas referentes à modelação aleatória de falhas e inatividades:

- **1** — Ignorar estes efeitos;
- **2** — Não modelar explicitamente, mas aumentar os tempos de processamento numa proporção adequada;
- **3** — Usar valores constantes para o tempo de inatividade e manutenção;
- **4** — Usar distribuições estatísticas para o tempo de inatividade e manutenção.

A primeira alternativa geralmente não é aconselhável. Essa medida “é certamente uma técnica de modelação irresponsável caso as falhas tenham um alto impacto nos resultados”.

A segunda possibilidade, que modela as falhas ajustando os tempos de processamento aplicados a cada etapa, pode ser uma aceitável aproximação sob circunstâncias limitadas. Se cada

entidade for sujeita a um largo número de pequenos atrasos associados ao tempo de inatividade de equipamentos, então o total desses atrasos poderá ser adicionado ao tempo de processamento obtendo um tempo de processamento ajustado. Se o tempo de atraso total e o tempo de processamento puro forem de natureza aleatória, deve-se usar uma distribuição estatística apropriada para o tempo total de processamento ajustado. Se o tempo de processamento puro for constante enquanto que o atraso num ciclo for aleatório, então não é claro ajustar o tempo de processamento por um fator constante.

A terceira abordagem, usando durações constantes para falhas e manutenção, pode ser apropriada quando, por exemplo, a paragem é realizada para manutenções que estão previstas no plano de atividades.

A última possibilidade, modelar de acordo com apropriadas distribuições estatísticas, é a técnica mais adequada, contudo exige dados de produção atuais bem como informações sobre todos os equipamentos.

### 2.8.3.2 Tempo até ocorrer falha

O tempo até ocorrer uma falha pode ser medido em tempo do relógio, tempo de funcionamento, número de ciclos ou número de peças processadas [19].

O desgaste de uma máquina ocorre somente quando a mesma está em uso. Assim, o tempo de falha é medido em relação ao tempo de funcionamento e não ao tempo do relógio. Por outro lado, se o tempo até à falha for de 90 horas, o modelo irá manter-se em funcionamento desde a última falha e, quando 90 horas forem atingidas, o processamento será interrompido e ocorrerá um tempo de inatividade.

As interrupções de relógio podem estar associadas à manutenção programada, por exemplo, mudança de óleo a cada 3 meses. Tempos de inatividades com base no relógio também podem ser aplicados para equipamentos que estão ininterruptamente ocupados ou equipamentos que funcionam mesmo quando não estão a processar entidades.

As falhas de ciclo são baseadas na quantidade de utilizações do recurso. Por exemplo, após cada 50 usos de uma ferramenta, ela necessita de manutenção. Os tempos de inatividade são baseados no número de tempos de ciclo ou no número de produtos processados e, no modelo, é realizada uma contagem até esse valor ser atingido. Os usos típicos de tempos de inatividade com base no tempo de ciclo podem ser associados às manutenções ou substituição de peças.

O tempo para reparação é mais uma questão a ter em consideração. Este valor pode ser constante ou variável de acordo com o tempo de atraso do recurso e da reparação.

## 2.9 Otimização e simulação

Até ao último milénio, a otimização e a simulação foram praticamente mantidas em separado. Contudo, esta barreira tem se tornado cada vez mais permeável em consequência da necessidade de se obter resultados de investigação ideais e mais próximos da realidade.

Segundo Fu [45], as rotinas de otimização são um acréscimo aos mecanismos de simulação



e devem ser capazes de lidar com a ampla gama de problemas que um usuário pode encontrar. O autor considera que os *softwares* de simulação falham em explorar as pesquisas de otimização, a partir da qual existem muitos resultados úteis que têm potencial para melhorar drasticamente a eficiência dos processos.

Glover et. al [8], implementaram um otimizador genérico que pode ser usado em sistemas diferentes. Relativamente ao modelo de simulação, consideram que este representa o sistema e pode adaptar-se e evoluir para incorporar elementos adicionais, enquanto que as rotinas de otimização permanecem as mesmas. Desse modo, há uma separação completa entre o modelo que representa o sistema e o procedimento adotado para resolver problemas de otimização.

O procedimento de otimização usa os *outputs* do modelo de simulação, responsável por avaliar os resultados dos *inputs* inseridos no modelo. Com base nesta avaliação, e em função do histórico de resultados que foram integrados e analisados, o procedimento de otimização é adaptado com novos conjuntos de parâmetros de entrada (ver Figura 2.13). Este ciclo de pesquisa gera sucessivamente variadas avaliações que proporcionam uma trajetória altamente eficiente para as melhores soluções. O processo é repetido até que um critério de término apropriado seja satisfeito (geralmente dado pela preferência do usuário em função do tempo dedicado à pesquisa).

Os métodos de otimização permitem a garantia de obter a solução ideal para os problemas modelados. Além disso, a base matemática e a sua formulação podem ser adaptados com relativa facilidade. No entanto, fatores não lineares e estocásticos, comuns em todos os sistemas, não são considerados devido à sua variabilidade e podem tornar o modelo impraticável. Os métodos de simulação, ao contrário, podem incluir um alto nível de detalhe, incluindo fatores não lineares e estocásticos que aproximam toda a análise de uma situação real.

Uma vez que a procura por soluções ótimas não é obtida na simulação, a combinação entre otimização e simulação permite resolver esta limitação. De forma resumida, a interação entre a otimização e simulação tem como objetivo superar as limitações de cada método com as vantagens do outro.

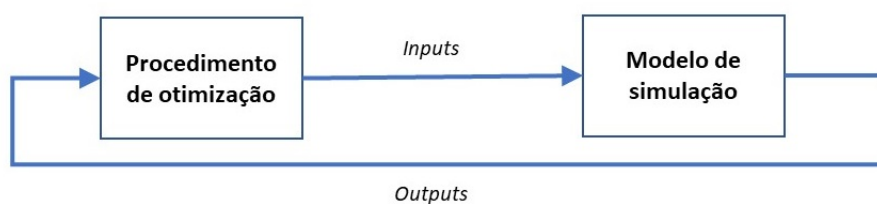


Figura 2.13: Combinação otimização-simulação, adaptado de [8].



## Capítulo 3

# Metodologia

Este capítulo inicia com a descrição do problema e respetiva análise de forma a obter a informação necessária para a definição das rotas *milk run*. Por último, é mencionada a abordagem adotada, nomeadamente o modelo de otimização e as considerações da simulação.

A metodologia proposta será também aplicável noutras situações, tais como, futuras adaptações no *layout* da fábrica, diferentes configurações dos veículos ou diferentes sequências de produção.

### 3.1 Descrição do problema

O problema base reside em estudar o impacto da implementação de um sistema de AGVs responsável pelo transporte dos materiais entre as áreas de trabalho numa abordagem *milk run*. A otimização das rotas tem como objetivo principal aumentar a produtividade do sistema.

As FOUPs (doravante designadas por produtos) são lotes constituídos por 12 ou 25 *wafers*. Estes possuem tempos de processamento e sequências de produção diferentes. Assim sendo, os fluxos de produção requerem uma configuração e sequenciamento diferenciados:

- os produtos não necessitam de ser processados em todas as máquinas e a sua sequência é única;
- a mesma máquina pode desempenhar diferentes tempos de processamento de acordo com o tipo de produto.

Existem outros fatores críticos que é necessário controlar, nomeadamente: o *lead time* da linha de produção, o WIP global, a gestão de *stock* dos *buffers* de entrada e saída das células e a taxa de utilização dos veículos.

### 3.2 Modelação do *layout*

A planta de fábrica está organizada em células de trabalho (doravante designadas por zonas) (ver Figura 3.1) que agrupam um conjunto de máquinas.

Cada zona contém dois *buffers*: *Buffer* de entrada – responsável para satisfazer as necessidades de produção das máquinas – e *Buffer* de saída – após o produto cumprir o processamento da zona, este deve aguardar para voltar a ser transportado. Não existe qualquer modelação do transporte dos materiais no interior das zonas, contudo, os produtos irão respeitar a capacidade de produção da zona correspondente, ou seja, só sairão o *buffer* de entrada quando forem cumpridas condições para serem processadas.

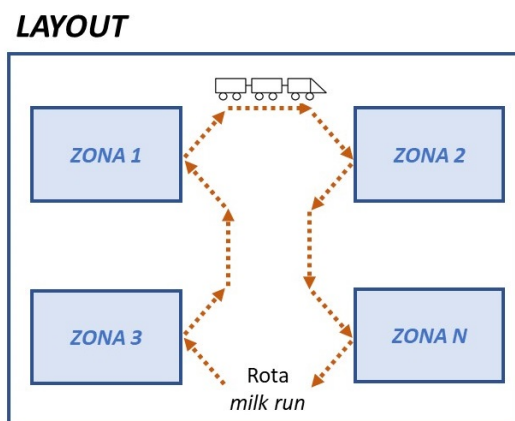


Figura 3.1: Distribuição da planta de fábrica em diferentes zonas.

O comboio *milk run* irá atravessar em primeiro lugar o *buffer* de entrada e posteriormente o de saída. Isto permite uma maximização da carga do AGV uma vez que descarrega os produtos referentes à zona e, em seguida, transporta aqueles que já foram processados (ver Figura 3.2).

Os produtos apenas são descarregados no *buffer* de entrada se tiverem indicação para serem processados em alguma máquina da respetiva zona. Caso contrário, continuam o percurso. Em consequência, o AGV pode não ter capacidade para transportar os produtos que se encontram em fila de espera no *buffer* de saída, nessas circunstâncias, têm que esperar por um novo ciclo de transporte.

### 3.2.1 Características das zonas

Os produtos são transportados do *buffer* de entrada para processamento caso sejam reunidas as condições necessárias. A principal restrição remete para a capacidade de produção: a cada zona está associada uma capacidade, ou seja, o WIP máximo suportado pelo conjunto de equipamentos. Assim sendo, se o WIP máximo da zona for alcançado, os produtos devem aguardar no *buffer* de entrada.

Conhecendo o *Throughput* (TP) e o *Lead Time* (LT) e aplicando a Lei de Little (ver equação 3.1) é possível obter o valor do WIP. O TP é calculado com base na taxa média diária de produção de cada zona enquanto que o LT corresponde à mediana do tempo de processamento, ou seja, o

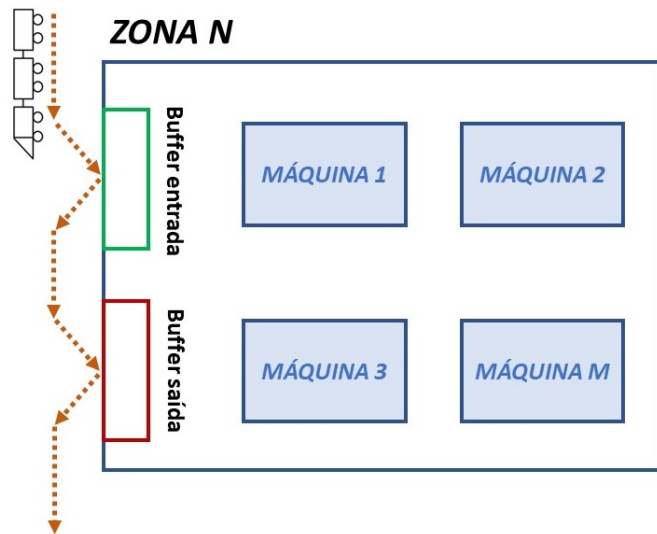


Figura 3.2: *Buffers* de entrada e saída de uma zona.

período de tempo desde que o produto abandona o *buffer* de entrada e alcança o *buffer* de saída (ver Figura 3.3).

$$\text{Lei de Little: } WIP = TP \times LT \quad (3.1)$$

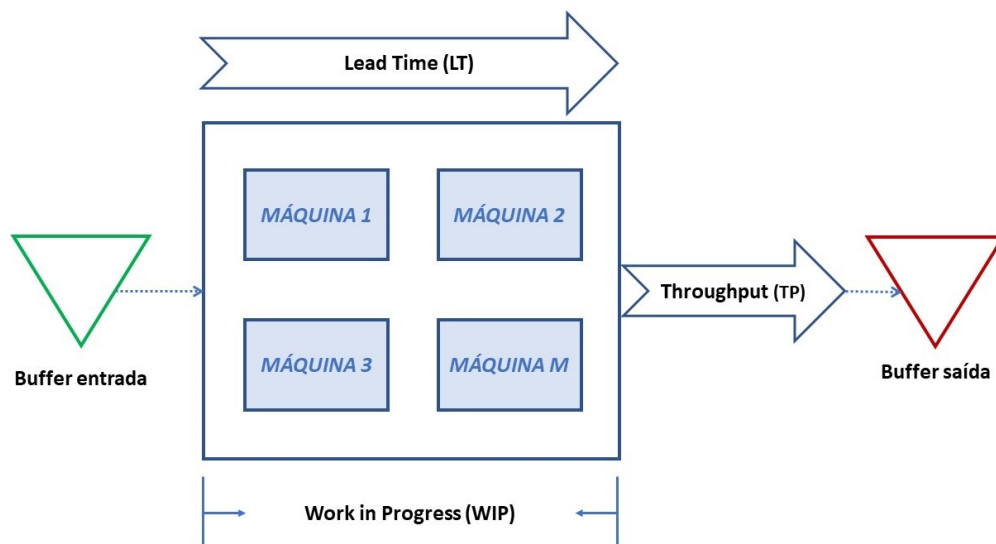


Figura 3.3: Aplicação da Lei de Little para cálculo do WIP máximo de cada zona.

### 3.2.2 Tempos de processamento

Após o produto abandonar o *buffer* de entrada este deve dar início ao seu processamento. Uma vez que a abordagem ao problema organiza a produção em zonas, constituídas por um agrupamento de máquinas, o seu tempo de processamento é o somatório individual de cada tempo de processamento. As Tabelas 3.1 e 3.2 são um exemplo da abordagem seguida:

- **Tabela 3.1** — Define a sequência de produção de cada produto nas máquinas, o respetivo tempo de processamento e a localização da máquina;
- **Tabela 3.2** — Nova tabela de sequência cujas etapas de produção são referentes à zona e com tempo de processamento igual ao somatório individual de cada máquina.

Tabela 3.1: Sequências de produção com referência às máquinas e respetivos tempo de processamento.

Produto	Sequência em máquinas	Tempo de processamento	Zona
Produto 1	Máquina 1.1	10	Zona 1
	Máquina 1.2	10	
	Máquina 2.1	15	Zona 2
	Máquina 1.3	10	Zona 1
	Máquina 1.1	20	
	Máquina 1.1	40	
Produto 2	Máquina 3.3	10	Zona 3
	Máquina 3.2	10	
	Máquina 3.1	15	

Tabela 3.2: Sequências de produção com referência às zonas e respetivos tempos de processamento.

Produto	Sequência em zonas	Tempo de processamento
Produto 1	Zona 1	$10 + 10 = 20$
	Zona 2	15
	Zona 1	$10 + 20 + 40 = 70$
Produto 2	Zona 3	$10 + 10 + 15 = 35$

Este procedimento não modela os sistemas internos de manuseamento de materiais, filas de espera entre as máquinas e respetivos tempos de *setup*.

### 3.3 Definição das rotas

#### 3.3.1 Critérios

Finda a análise do *layout* é remetida a necessidade de definir rotas que otimizem o AMHS. Esta etapa é executada de acordo com os seguintes critérios heurísticos:

- condições físicas da fábrica;
- fluxos de materiais;
- número total de zonas atravessadas pela rota;
- distância percorrida pela rota.

Estas assunções caracterizam os *inputs* principais do modelo de otimização que se responsabiliza por avaliar a melhor solução em função do objetivo e das restrições do sistema (ver Capítulo 3.7).

Um exemplo da definição de rotas segundo este processo é demonstrado na Figura 3.4.

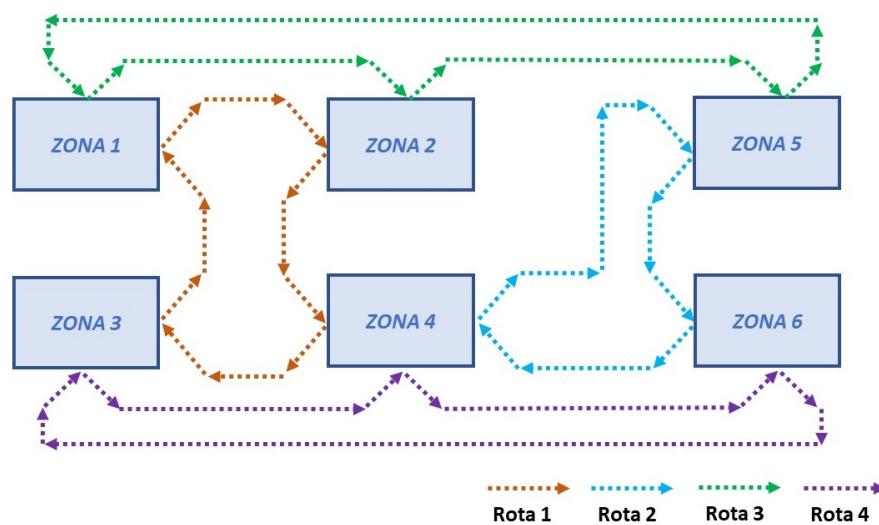


Figura 3.4: Exemplo da definição de quatro possíveis rotas.

#### 3.3.2 Múltiplas rotas

As despesas associadas ao investimento e manutenção dos AGVs podem ser significativas. O objetivo do modelo de otimização (ver Capítulo 3.7) procura minimizar o número de rotas, ou seja, reduzir o número de AGVs sendo que a cada rota está associada um veículo.

Contudo, a utilização de apenas um veículo pode não garantir a operação do sistema, sendo necessário a implementação de múltiplas rotas. Pelo que, é necessário conhecer a necessidade da transferência de produtos entre diferentes rotas e o seu mecanismo de funcionamento.

### 3.3.2.1 Exemplo

A Figura 3.5 ilustra um exemplo de dois trajetos: “Rota 1” e “Rota 2”.

As subsequentes ilustrações e demonstrações são baseadas no seguinte problema: um produto processado na “Zona 1”, necessita de ser transportado para uma máquina que se situa na “Zona 6”.

Sendo que as duas zonas são atravessadas por diferentes rotas, é necessário um ponto de transferência entre as mesmas.

O produto deve:

- 1 — ser transportado na “Rota 1”;
- 2 — ser descarregado na “Zona 4”;
- 3 — ser transportado na “Rota 2”;
- 4 — ser descarregado na “Zona 6”.

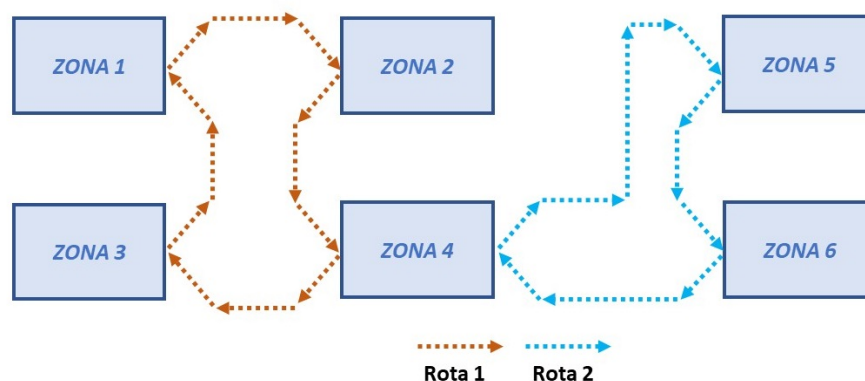


Figura 3.5: Representação de duas rotas *milk run* no interior da planta de fábrica.

A “Zona 4”, além das máquinas associadas, tem o papel de ponto de acoplamento entre a “Rota 1” e a “Rota 2”. A Figura 3.6 retrata essa transferência entre rotas.

Uma vez que produto não é processado na “Zona 4” e deve ser transportado pela AGV da “Rota 2”, este é diretamente descarregado na fila de espera do *buffer* de saída e aguarda por um novo transporte. Colisões entre os veículos não são consideradas.

Os *buffers* de saída das zonas de acoplamento terão uma taxa de utilização bastante superior em comparação aos das restantes zonas. Efetivamente, este *buffer* armazena, enquanto aguardam por transporte, os produtos já processados da respetiva zona e todos aqueles que necessitam transferência de rotas.

A fila de espera utiliza a abordagem FIFO (*First-in-First-Out*) independentemente de o produto ser proveniente do interior da zona ou do veículo.



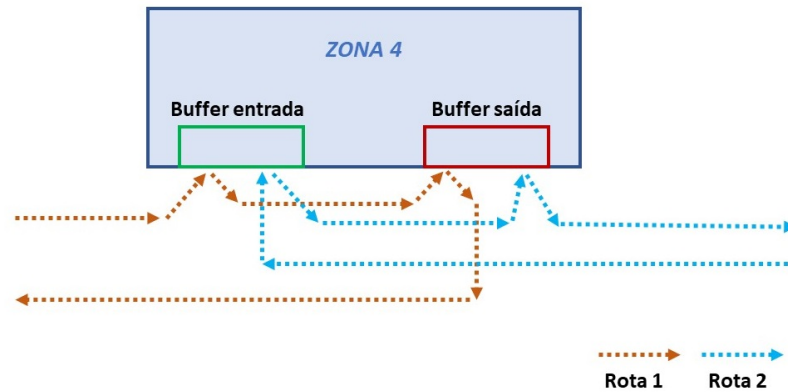


Figura 3.6: Zona de acoplamento entre duas rotas. Em ambos os percursos, os veículos atravessam primeiro o *buffer* de entrada seguido pelo *buffer* de saída.

### 3.4 Ciclo *milk run*

Uma rota *milk run* pode ser caracterizada pelo seu ponto inicial, percurso, duração do trajeto e horário de partida. Após um ciclo de transporte, o veículo deve regressar à posição inicial e aguardar pelo ciclo seguinte. Um período de paragem prolongado provoca a acumulação de produtos nos *buffers* de saída, no entanto, se diminuirmos esse valor podemos provocar ciclos com baixa taxa de utilização da capacidade dos AGVs.

Rotas sem o transporte de materiais é sinónimo de processos sem valor acrescentado, ou seja, contraria a filosofia TPS e, por outro lado, remete a custos operacionais desnecessários e ao desgaste das baterias dos veículos. Em suma, torna-se necessário limitar o horário de partida dos AGVs tendo em consideração a sustentabilidade do sistema.

Na abordagem ao problema serão analisados diferentes comportamentos, ou seja, ciclos sem paragem ou paragens de 10 min e 20 min.

### 3.5 Características dos veículos

Os AGVs têm propriedades associadas. Parte dessas características são fundamentais no modelo de otimização e simulação uma vez que o objetivo é aproximar a solução de uma situação real.

Na Tabela 3.3 são definidos os quatro estados possíveis que os AGVs enfrentam.

Em situações reais, os veículos necessitam de carregar as baterias. As suas taxas de utilização são baseadas em função dos respetivos estados. A Tabela 3.4 representa a duração das baterias em função do estado e o respetivo tempo de carregamento.

Após o veículo obter uma percentagem de bateria restante inferior a 20%, esse deve parar o carregamento de produtos, regressar ao ponto inicial e dar início ao carregamento. Idealmente as baterias podiam ser carregadas durante o tempo de espera para o novo ciclo, contudo, esse método

provocaria desgaste nas mesmas, daí a necessidade de diferenciar estes dois estados (*Stopped* e *Charging*).

As características dos AGVs são baseadas no veículo MiR 100 [46], ou seja, a velocidade é 0,7 m/s e o tempo de *loading* e *unloading* é 25 seg.

O comportamento do sistema será avaliado de acordo com diferentes valores de capacidade de transporte: 1, 3 ou 6 produtos.

Tabela 3.3: Estados dos AGVs

Índice	Estado	Descrição
0	<i>Moving</i>	O AGV está em movimento sem transportar produtos
1	<i>Transporting</i>	O AGV está em movimento a transportar produtos
2	<i>Charging</i>	O AGV está a carregar a bateria
3	<i>Stopped</i>	O AGV está na posição de arranque à espera de iniciar o próximo ciclo

Tabela 3.4: Duração das baterias e tempo de carregamento.

	Estado	Tempo
Duração das baterias	<i>Moving</i>	6 (hr)
	<i>Transporting</i>	4 (hr)
	<i>Stopped</i>	8 (hr)
Carregamento	<i>Charging</i>	60 (min)

### 3.6 Otimização e simulação

O problema pode ser dividido em duas fases:

- análise do *layout* e implementação de um modelo para obter uma solução ótima, ou seja, a definição das rotas dos AGVs no *layout* da fábrica;
- simulação dos processos tendo em consideração as características dos veículos e sequências de produção.

A dependência entre as duas fases é perceptível, sendo a sua resolução em simultâneo vantajosa.

### 3.7 Modelo de otimização

A plataforma CPLEX é adotada para otimizar o sistema. O presente modelo procura obter soluções ótimas das rotas em termos de custo total de operação.

Vários cenários com diferentes números de veículos são desenhados como *inputs* principais do modelo. As rotas devem ser compatíveis com as condições físicas do *layout* e do fluxo de materiais.

A cada rota é associada a respetiva distância, custos operacionais e, de acordo com a velocidade média do AGV, os respetivos tempos de viagem. A velocidade do veículo é constante e

não há tráfego durante o movimento dos mesmos. Todos os veículos são idênticos e não ocorrem falhas.

Cada ponto de stock  $(i, j)$  corresponde a uma área de paragem (*buffers* das áreas de produção). Não existe distinção entre o *buffer* de entrada e o de saída, ou seja, a sua combinação representa um ponto de *stock*.

O manuseamento de materiais dentro de cada zona de produção não é considerado.

O resultado final fornecerá o cenário com menores custos associados.

O modelo matemático aplicado no problema é apresentado em seguida, com os respetivos parâmetros, variáveis de decisão, restrições e função objetivo.

### 3.7.1 Formulação matemática

#### Índices

$i, j$	<i>Pontos de stock</i>
$r, r'$	<i>Rota</i>

#### Parâmetros

$\lambda_r$	Tempo fixo da viagem da rota $r$
$\sigma_r$	Custo de transporte num ciclo da rota $r$
$\alpha_r$	Distância de cada rota $r$
$\omega$	Custo diário do veículo aplicado sobre taxas de amortização
$\mu$	Número mínimo de veículos no sistema
$\gamma$	Velocidade do veículo
$\eta$	Custo operacional por unidade de distância
$\delta$	Tempo útil disponível para cada rota
$\pi_i$	Tempo de <i>un-loading</i> no ponto de <i>stock</i> $i$
$\beta$	Número alto

#### Variáveis binárias

$X_{ri}$	1 se o ponto $i$ pertence à rota $r$
$P_r$	1 se $r$ for selecionado

#### Variáveis inteiras

$C_r$	Tempo de ciclo da rota $r$
-------	----------------------------

#### Conjuntos

<b>I</b>	Conjunto dos pontos de <i>stock</i>
<b>R</b>	Conjunto das rotas
<b>N<sub>r</sub></b>	Conjunto de pontos $i$ possíveis para cada rota $r$
<b>A<sub>r</sub></b>	Conjunto de rotas do mesmo cenário que a rota $r$

### 3.7.2 Restrições

As restrições do problema, bem como as respectivas interpretações, são em seguida apresentadas:

- Todos os pontos de *stock*  $i$  têm que pertencer a uma rota

$$\sum_r X_{ri} \geq 1, \quad \forall i \in \mathbf{I} \quad (3.2)$$

- Um ponto de *stock*  $i$  não pertence a uma rota se não houver forma de a rota o alcançar

$$\sum_{i \notin N_r} X_{ri} = 0, \quad \forall i \in \mathbf{I} \quad (3.3)$$

- O tempo fixo da viagem da rota  $r$  é determinado

$$\lambda_r = \frac{\alpha_r}{\gamma}, \quad \forall r \in \mathbf{R} \quad (3.4)$$

- O tempo de ciclo da rota  $r$  é determinado

$$C_r = \sum_i X_{ri} \times \pi_i + P_r \times \lambda_r, \quad \forall r \in \mathbf{R} \quad (3.5)$$

- O tempo de ciclo do veículo é restrito ao tempo fixo

$$C_r \leq \delta, \quad \forall r \in \mathbf{R} \quad (3.6)$$

- O número total de rotas é limitado ao número mínimo de veículos

$$\sum_r P_r \geq \mu \quad (3.7)$$

- Um ponto de *stock*  $i$  não é atribuído a uma rota não seleccionada

$$\beta \times P_r \geq \sum_i X_{ri}, \quad \forall r \in \mathbf{R} \quad (3.8)$$

- O custo operacional de cada rota  $r$  é determinado

$$\sigma_r = \eta \times \alpha_r, \quad \forall r \in \mathbf{R} \quad (3.9)$$

- Se uma rota for escolhida, todas as restantes rotas do mesmo cenário também devem ser escolhidas

$$P_r \times |A_r| \geq \sum_{r' \in A_r} P_{r'}, \quad \forall r \in \mathbf{R} \quad (3.10)$$

### 3.7.3 Função objetivo

O objetivo da otimização é reduzir o número de veículos necessários respeitando as restrições do problema. Esta função é formada por duas partes:

- **1ª** Custos de utilização diários dos veículos;
- **2ª** Custo operacional diário obtido através da multiplicação do custo de cada rota e o número total de percursos que realiza um dia.

$$\min \sum_r (P_r \times \omega) + \sum_r (P_r \times \sigma_r \times \frac{24 \times 60}{\delta}) \quad (3.11)$$

## 3.8 Modelo de simulação

O modelo de simulação de eventos discretos é desenvolvido para capturar as principais características dos processos de produção. O seu objetivo consiste em verificar o comportamento do sistema de acordo com as rotas fornecidas pelo modelo de otimização.

O SIMIO é um avançado *software* de simulação que permite instanciar os principais modelos que caracterizam o sistema, visualizar o seu comportamento a nível de animação gráfica e, em seguida, analisar os resultados com recurso a *dashboards*.

### 3.8.1 Simulação das zonas

O Capítulo 3.2.1 caracteriza a capacidade de produção das zonas. Desse modo, é anexada uma tabela (ver Tabela 3.5) que define para cada zona o seu respetivo WIP máximo de produção. Esse valor define a quantidade de produtos que podem ser processados simultaneamente.

Tabela 3.5: Tabela exemplo a anexar no modelo de simulação que define para cada zona a sua capacidade.

Zona	Capacidade
Zona 1	Capacidade 1
Zona 2	Capacidade 2
Zona 3	Capacidade 3

A ilustração da simulação das zonas é representada no exemplo da Figura 3.7. Após um produto ser depositado no *buffer* de entrada, o trabalhador (“*WorkerEntrada*”) avalia se existem condições para ser processado. Caso assim se confirme, este transporta os produtos para dar início ao seu processamento. Após o respetivo tempo de produção ser cumprido, um diferente trabalhador (“*WorkerSaida*”) transporta os produtos para o *buffer* de saída onde irá aguardar por novo transporte.

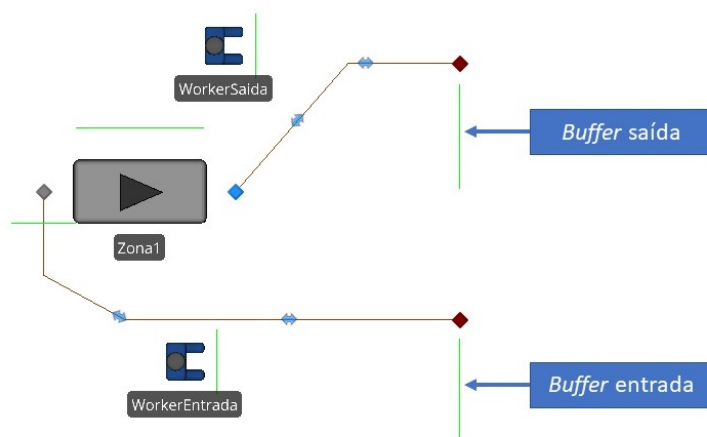


Figura 3.7: Ilustração de uma zona no *software* de simulação SIMIO.

### 3.8.2 Simulação dos AGVs

O Capítulo 3.5 caracteriza os AGVs e os seus principais parâmetros. Desse modo, é anexada uma tabela (ver Tabela 3.6) que define as propriedades dos veículos.

A cada AGV está associado a respetiva rota.

Tabela 3.6: Características dos AGVs.

Parâmetro	Valor	Unidade
Velocidade	0,7	m/s
Tempo de <i>loading</i>	25	seg
Tempo de <i>unloading</i>	25	seg
Duração da bateria se parado	8	hr
Duração da bateria se em movimento	6	hr
Duração da bateria se a transportar	4	hr
Tempo de carregamento da bateria	60	min

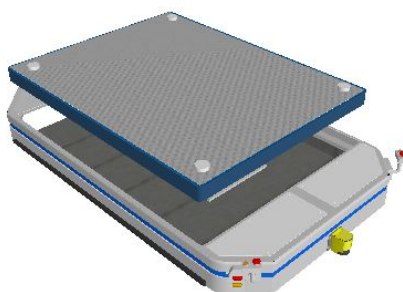


Figura 3.8: Ilustração do AGV em simulação.

### 3.8.3 Simulação dos produtos

O sistema de produção de uma empresa de semicondutores é caracterizado pela sua complexidade e filosofia *job shop*. Os produtos possuem tempos de processamento diferentes, sendo que existe reentrância nas zonas de produção. Desse modo, é necessário que a cada produto esteja associado a decorrente etapa e tempo de processamento.

A Tabela 3.7 é um exemplo que caracteriza essa variabilidade de tempos de processamento. A coluna “*Part Mix*” define a procura, ou seja, segundo a tabela 70% dos produtos simulados são do tipo “Produto 1”.

Tabela 3.7: *Part Mix*, sequência de produção por zonas e tempo de processamento.

ID	Produto	Part Mix	Sequência	Tempo de processamento
1	Produto 1	70	Zona 1	10
			Zona 2	20
			Zona 3	30
			Zona 1	15
2	Produto 2	30	Zona 2	10

Os produtos possuem estados que serão atualizados no decorrer da simulação:

- **NextStopNode** — este estado define a próxima zona no qual o produto deve ser processado. O veículo, ao visitar um *buffer* de entrada, pesquisa se algum dos produtos que transporta contém o “*NextStopNode*” igual ao local onde se encontra. Caso se confirme, os produtos são descarregados;
- **NextAGV** — informação relativa ao próximo veículo que irá transportar o produto. Este estado permite que, em locais de acoplamento atravessados por mais do que um veículo, informe o produto do correto AGV no qual deve ser transportado.



Figura 3.9: Ilustração dos produtos em simulação.

### 3.8.4 Simulação de falhas

As falhas dos equipamentos não são diretamente modeladas. Uma vez que a abordagem ao problema incide sobre zonas (aglomerados de máquinas), considerar a falha de uma zona corresponderia a uma falha global de todos os equipamentos nesse mesmo local. Desse modo, a modelação de inatividades e avarias é simulada de acordo com uma das alternativas de Banks et. al [19], ou seja, aumentar os tempos de processamento.

Tal como analisado na “Simulação dos produtos”, a cada etapa de processamento está associada um tempo de processamento. A esse valor será implementado uma distribuição triangular que possui um mínimo  $a$ , um valor máximo  $b$  e uma moda  $c$ , de modo a que a função de densidade de probabilidade seja zero nos extremos ( $a$  e  $b$ ). O valor  $a$  e  $c$ , respetivamente valor mínimo e moda, corresponderão ao tempo de processamento puro. O máximo  $b$  será um valor 5% superior ao tempo de processamento puro (ver Figura 3.10).

Este procedimento permite simular com maior aleatoriedade o processo devido às normais falhas nos equipamentos e produtos.

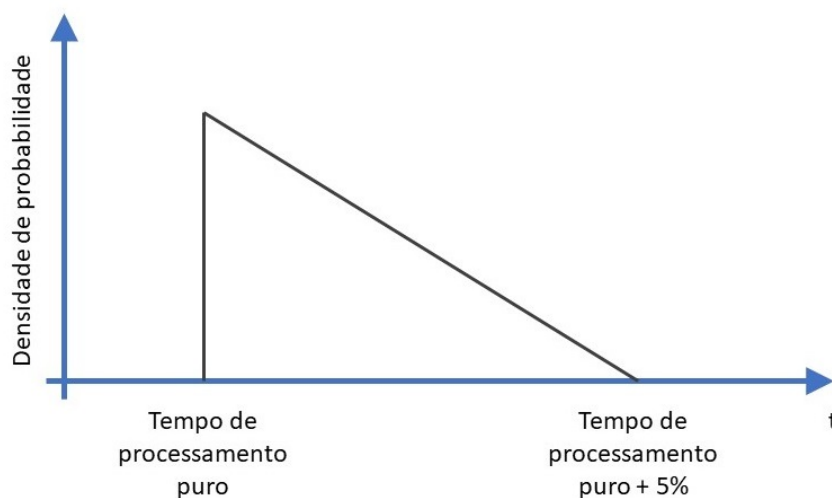


Figura 3.10: Distribuição triangular nos tempos de processamento.

### 3.8.5 Experiências de simulação

As experiências de simulação são usadas para definir um conjunto de cenários a serem executados usando o modelo de simulação.

Cada cenário é definido por variáveis de controlo (por exemplo: capacidade de carga dos AGVs) e respostas de saída (por exemplo: *lead times*).



Uma vez que a maioria dos modelos contém componentes aleatórios (por exemplo: taxa entrada de produtos no sistema ou tempos de processamento), as replicações do cenário são necessárias para permitir o cálculo dos intervalos de confiança nos resultados.

Na abordagem ao problema foram criadas experiências para as diferentes combinações de parâmetros (ver Tabela 3.8).

Tabela 3.8: Combinação de parâmetros para as experiências de simulação.

<b>Experiência</b>	<b>Capacidade dos AGVs</b>	<b>Ciclo <i>milk run</i> (min)</b>
1	1	0
2	1	10
3	1	20
4	3	0
5	3	10
6	3	20
7	6	0
8	6	10
9	6	20



## Capítulo 4

# Implementação da metodologia

Este capítulo apresenta o caso de estudo e implementa a abordagem definida no capítulo anterior.

De forma a manter a confidencialidade do sistema produtivo da empresa os nomes dos produtos serão substituídos por "Produto" seguido do seu índice de identificação. A mesma abordagem é adotada para o nome dos equipamentos, ou seja, "Máquina" seguido do índice de identificação.

### 4.1 Caso de estudo

Atualmente, na empresa de semicondutores, está em vigor um sistema de manuseamento manual, contudo um AMHS previne as falhas e as reduções de rendimento provocados pela vibração do decorrente método e aumenta entregas JIT, limitando o *lead time* dos produtos.

#### 4.1.1 Apresentação do *layout*

A Figura 4.1 representa o *layout* da área de produção ao qual está previsto a implementação do sistema autónomo para a movimentação de materiais.

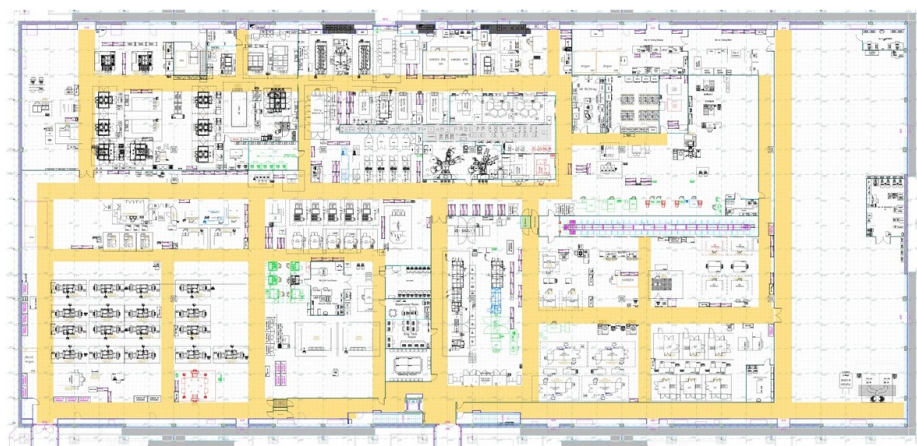


Figura 4.1: *Layout* da área de produção da empresa de semicondutores.

Após dados fornecidos pela empresa, o *layout* foi agrupado em zonas de produção: Z1, Z2, Z3, Z4, Z5, Z6, Z7, Z8, Z9, Z10 e *Wafer Prep* (ver Figura 4.2).

A zona *Wafer Prep* (doravante *WPR*) corresponde a uma área de produção exterior ao *layout* definido na Figura 4.1, contudo, e, por estar incluída na sequência de produção, é considerada na análise do problema. No modelo de otimização e simulação foi definido a distância de 100 m entre o *layout* global e a zona *WPR*.

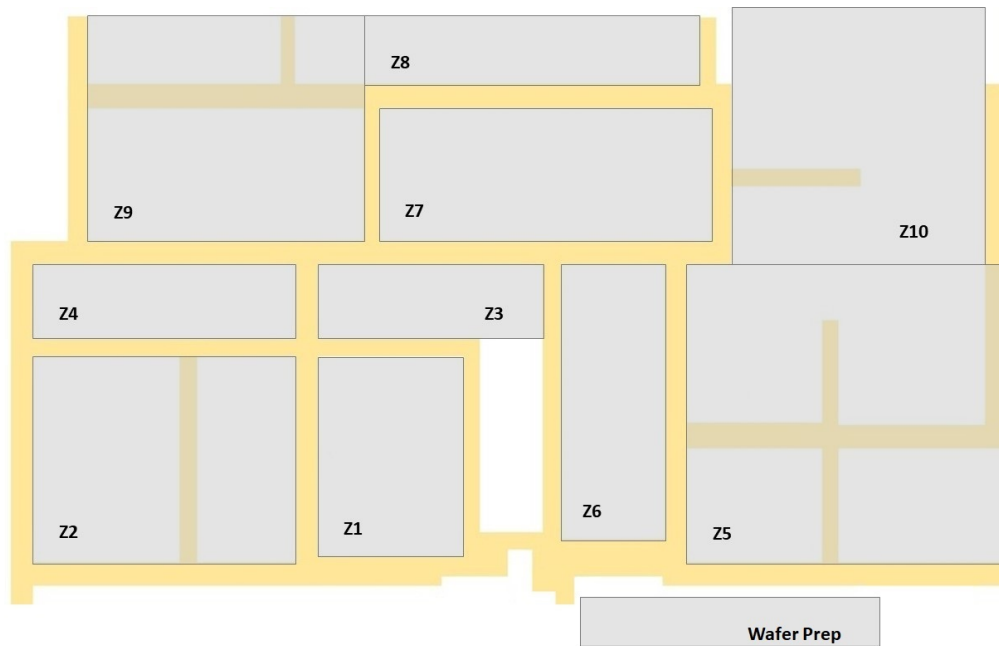


Figura 4.2: *Layout* do sistema de produção agrupado em zonas de processamento.

### 4.1.2 Apresentação dos equipamentos

A Tabela 4.1 lista para cada zona os respetivos equipamentos.

Ainda que as zonas Z1 e Z6 não possuam equipamentos necessários na sequência de produção, serão de igual modo modeladas na otimização e simulação permitindo futuras adaptações na fábrica.

Tabela 4.1: Listagem dos equipamentos contidos em cada zona.

Zona	Máquina	Zona	Máquina	Zona	Máquina	Zona	Máquina
Z1			4		56		74
Z2	18		12		57		75
	19		13		60		76
	40		17		61		77
	41		31		69		78
	50		32		84		79
	58		62	Z8	6	Z10	59
Z3	11		71		7		63
	14		72		8		81
	15		73		9	WPR	2
	16	Z6			65		5
Z4	20	Z7	10		66		21
	23		33		67		22
	26		34		68		24
	27		35		70		25
	28		45		80		38
	29		46		82		39
	30		47		83		42
	44		48	Z9	36		43
	54		49		37		51
Z5	1		52		55		
	3		53		64		

### 4.1.3 Apresentação dos produtos

A Tabela 4.2 lista para cada produto:

- **tamanho do lote** — cada FOUP é constituída por 12 ou 25 *wafers*. O tipo de produto define a quantidade do seu respetivo lote;
- **lead time médio** — período de tempo médio desde que cada lote é lançado em produção até ao seu término;
- **etapas de processamento** — para cada produto o número de etapas de processamento em máquinas e em zonas. É evidente a reentrância de produtos nas máquinas caracterizando o sistema de produção *job shop* e, em apenas onze zonas distintas no *layout*, existem produtos a visitar mais de setenta zonas, demonstrando a complexidade do sistema produtivo de semicondutores.

Os produtos serão simulados em lotes.

Tabela 4.2: Características dos produtos.

Produto	Tamanho lote	Lead time (dias)	Etapas de processamento	
			Em máquinas	Em zonas
1	12	sem info.	116	59
2	12	sem info.	115	59
3	12	sem info.	115	59
4	12	sem info.	115	59
5	12	24	115	59
6	12	13	91	54
7	12	10	114	68
8	12	12	114	68
9	12	sem info.	16	7
10	25	11	111	71
11	25	14	112	71
12	12	12	75	32
13	12	11	115	70
14	12	14	119	74
15	12	14	119	72
16	12	16	85	44
17	12	13	77	37
18	12	13	77	37
19	25	8	79	50
20	12	16	86	41

#### 4.1.4 Planos de produção

A empresa forneceu cinco planos de produção que serão simulados para cada cenário de rotas e em função de diferentes parâmetros (ver Tabela 4.3).

A quantidade das *wafers* é convertida em lotes. A quantidade de lotes em cada plano de produção corresponde à coluna "*Part Mix*" (ver Tabela 3.7 – página 43), ou seja, entre cada plano as quantidades são distribuídas num peso entre 0% a 100% que refletem a probabilidade de um produto ser lançado em produção. A simulação da produção é realizada durante um período de 60 dias mesmo que ultrapasse o número de *wafers* definidas no plano.

Em suma, os planos de produção definem apenas a taxa de lançamento de cada produto.

Tabela 4.3: Planos de produção. Valores em quantidade de *wafers*.

Produto	Plano 1	Plano 2	Plano 3	Plano 4	Plano 5
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0
6	324	504	0	328	144
7	1518	168	492	12	600
8	0	0	0	0	7
9	0	0	0	0	0
10	150	150	150	172	148
11	325	650	700	875	600
12	84	36	0	120	132
13	0	1044	756	444	300
14	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0
16	96	96	60	60	132
17	0	60	96	24	0
18	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0

#### 4.1.5 Capacidades de produção

A Figura 4.3 representa as etapas para o cálculo do inventário máximo suportado por cada zona (WIP).

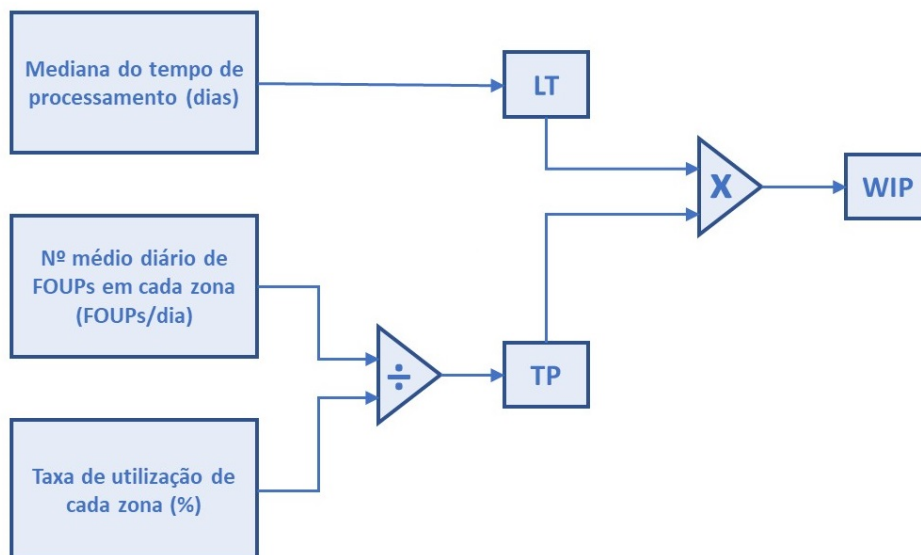


Figura 4.3: Metodologia para o cálculo do WIP de cada zona.

##### Mediana do tempo de processamento

Os tempos de processamento em cada zona apresentam valores bastante discrepantes, ou seja, a variar entre os 0,12 e os 7374 min. Desse modo foi escolhida a métrica mediana que retorna a tendência central para distribuições numéricas distorcidas, impedindo que valores individuais influenciam drasticamente o resultado final.

A mediana do tempo de processamento consistirá no LT a aplicar na Lei de Little.

##### Número médio diário de FOUPs

Em função dos dados de produção fornecidos pela empresa e para um período de 8 dias, foram contabilizados o número de FOUPs lançadas em cada zona de produção.

##### Taxa de utilização

Para um período de 8 dias, foram analisadas as taxas de utilização dos equipamentos referentes a cada zona. Em resultado final é obtida a taxa de utilização média de cada zona.



### Inventário máximo - WIP

Em resultado dos valores obtidos é possível calcular o WIP de cada zona.

Em simulação é realizada um arredondamento para baixo às unidades.

#### 4.1.5.1 Fluxo de materiais

Com base nas sequências de processamento dos vinte produtos, foi tabelada o fluxo de materiais, ou seja, contabilizar o número de transferências de materiais entre cada zona. Esta medida permite observar o fluxo de produção de modo a definir cenários de rotas que serão implementados no modelo de otimização (ver Tabela 4.4).

A Tabela 4.5 distingue os três grupos principais de fluxos para  $N$  número de transferências:

- **A** —  $N \geq 100$ ;
- **B** —  $50 \leq N < 100$ ;
- **C** —  $25 \leq N < 50$ ;

Estes grupos permitem compreender as zonas com maior número de transferências. Desse modo, é necessário definir rotas que satisfaçam estas condições, ou seja, é importante que os percursos tenham forte consideração sobre a transferências do grupo A e, se possível, que a ligação seja direta.

Tabela 4.4: Fluxos de materiais entre as zonas de produção.

		Para										
		Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	WPR
De	Z1	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Z2	0	-	0	14	2	0	2	0	0	16	0
	Z3	0	5	-	3	21	0	56	0	15	9	0
	Z4	0	9	32	-	0	0	45	0	16	0	7
	Z5	0	5	29	0	-	0	10	0	1	2	5
	Z6	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0
	Z7	0	0	27	54	16	0	-	51	148	44	0
	Z8	0	0	5	0	0	0	50	-	13	23	8
	Z9	0	5	16	27	0	0	142	0	-	18	1
	Z10	0	7	0	11	3	0	27	45	16	-	3
WPR		0	2	0	0	11	0	8	3	0	0	-

Tabela 4.5: Fluxos com maior intensidade.

A		B		C	
De	Para	De	Para	De	Para
Z7	Z9	Z3	Z7	Z4	Z3
Z9	Z7	Z7	Z4	Z4	Z7
		Z7	Z8	Z5	Z3
		Z8	Z7	Z7	Z3
				Z7	Z10
				Z9	Z4
				Z10	Z7
				Z10	Z8

## 4.2 Otimização

### 4.2.1 Desenho dos cenários

Após a definição dos fluxos de produção, com base no *layout* da fábrica e as respectivas condições físicas, foram definidos dez diferentes cenários formados por uma ou mais rotas.

De forma a analisar na simulação o comportamento para diferentes números de veículos, foram desenvolvidos cenários com 1, 2, 3 e 4 rotas.

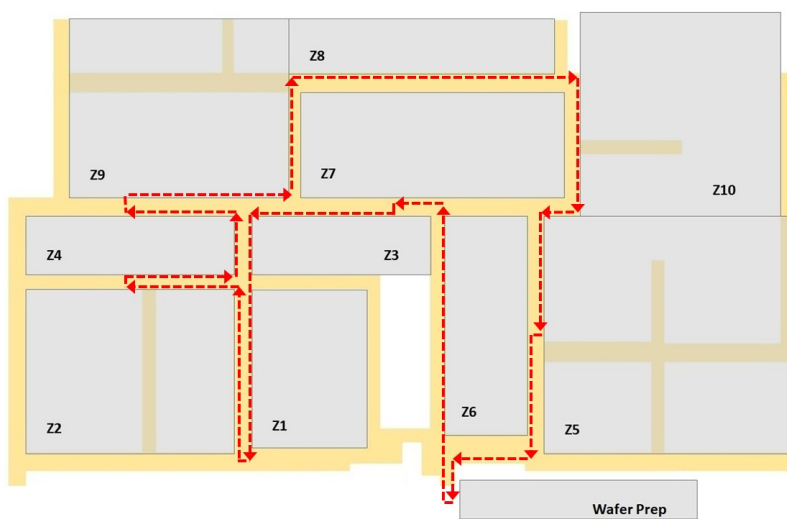


Figura 4.4: Cenário 1.1.

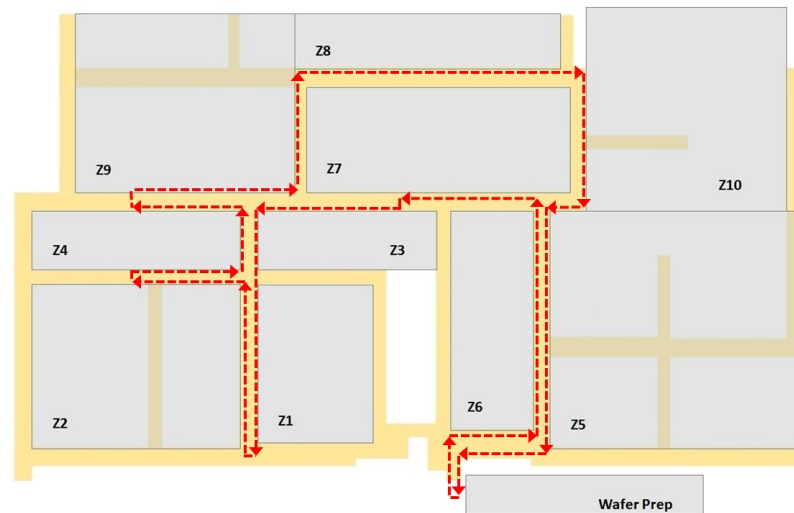


Figura 4.5: Cenário 1.2.

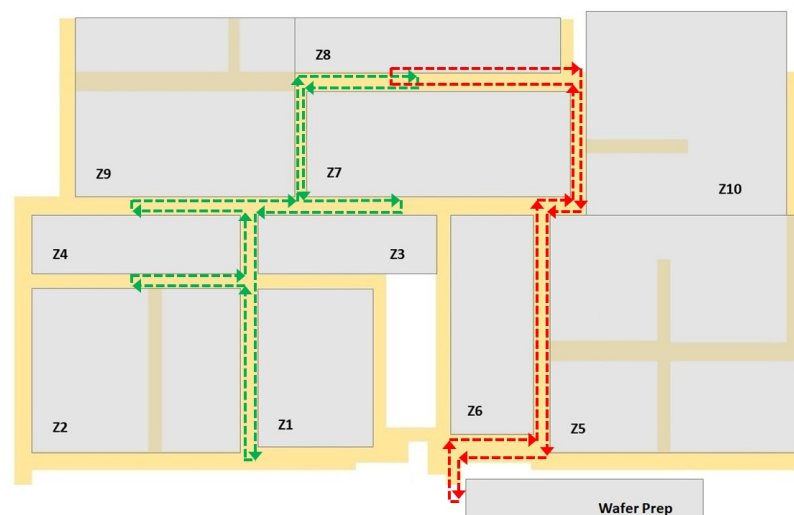


Figura 4.6: Cenário 2.1.

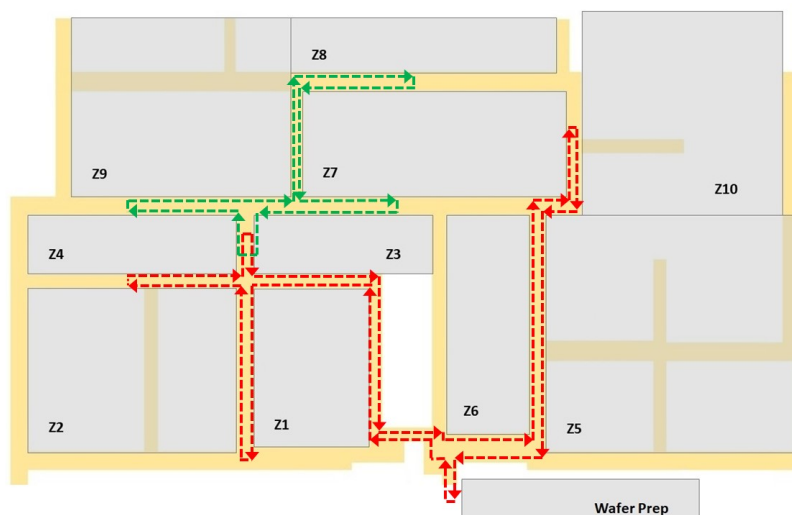


Figura 4.7: Cenário 2.2.

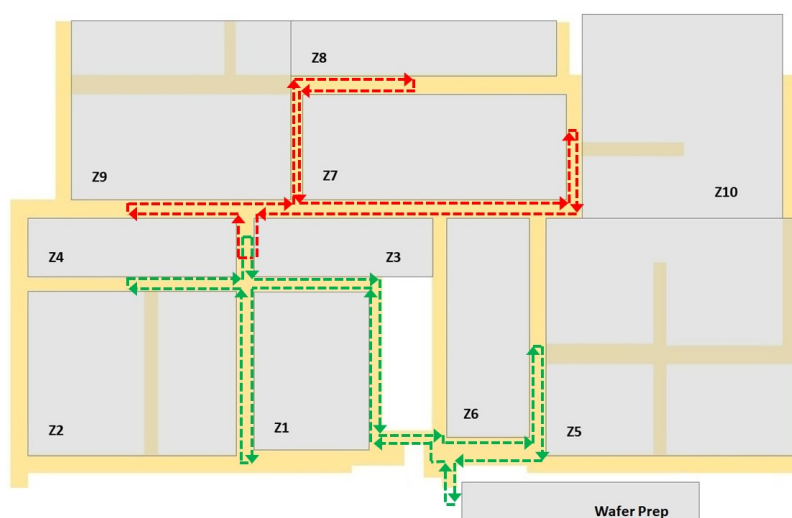


Figura 4.8: Cenário 2.3.

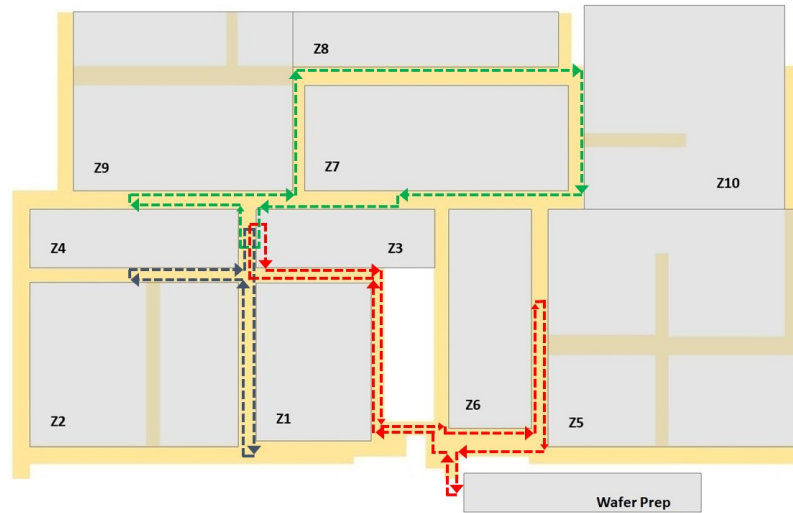


Figura 4.9: Cenário 3.1.

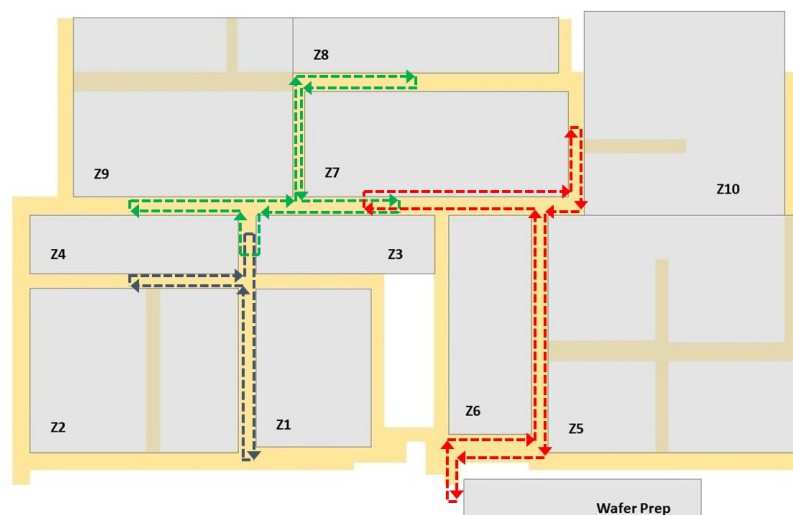


Figura 4.10: Cenário 3.2.

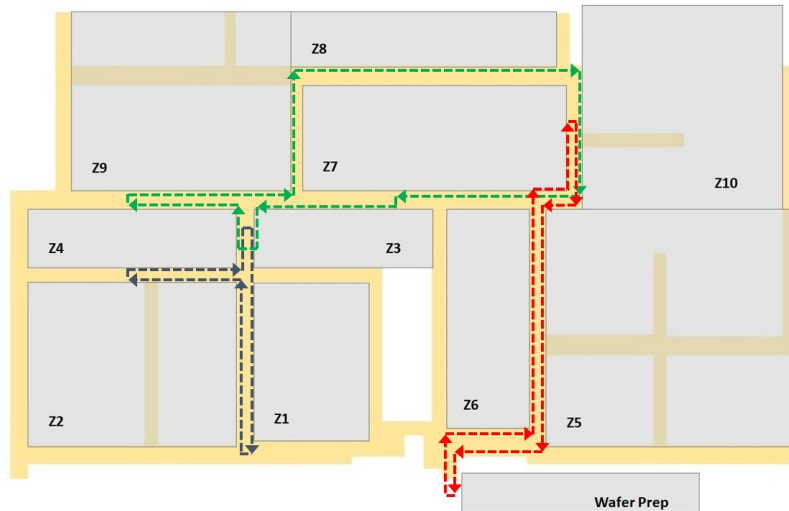


Figura 4.11: Cenário 3.3.

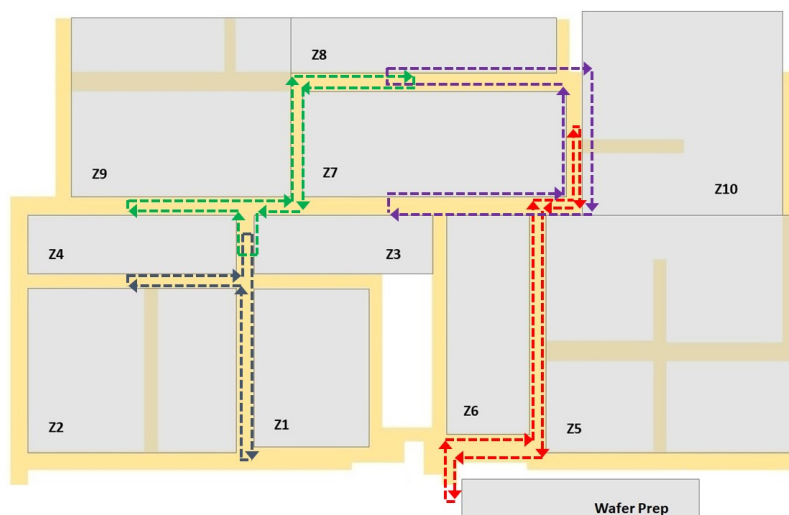


Figura 4.12: Cenário 4.1.

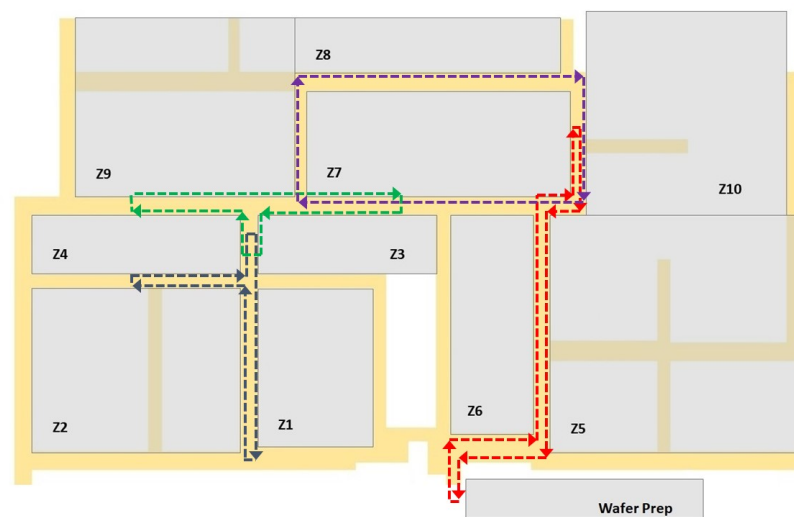


Figura 4.13: Cenário 4.2.

### 4.2.2 Parâmetros de otimização

Tabela 4.6: Listagem dos parâmetros para otimização.

Parâmetro	Valor	Unidade
$\omega$	1000	€
$\mu$	[1, 2, 3 ou 4]	-
$\delta$	20	min
$\gamma$	0,7	m/s
$\eta$	0,01	€/m

### 4.2.3 Índices $i$

O armazém de abastecimento (*Source area*) é considerado como um ponto de *stock* e é o ponto inicial de onde os produtos iniciam o trajeto. Este situa-se no início da zona Z2.

O local de finalização de processo (*Shipping area*) é de igual forma considerado como ponto de paragem pelas rotas e situa-se entre a zona Z5 e WPR.

Tabela 4.7: Índices  $i$  do modelo de otimização.

Índice $i$	Zona	$\pi$ (min)
0	<i>Source area</i>	0,4
1	Z1	0,4
2	Z2	0,4
3	Z3	0,4
4	Z4	0,4
5	Z5	0,4
6	Z6	0,4
7	Z7	0,4
8	Z8	0,4
9	Z9	0,4
10	Z10	0,4
11	WPR	0,4
12	<i>Shipping area</i>	0,4



#### 4.2.4 Índices $r$

Tabela 4.8: Índices  $r$  do modelo de simulação.

Número de rotas	Cenário	Índice $r$	$\lambda$ (min)	$\sigma$ (€)	$\alpha$ (m)
1	1.1	1	5,21	4,69	468,52
	1.2	2	5,29	4,76	475,90
2	2.1	3	2,19	1,97	196,97
		4	3,84	3,46	345,70
	2.2	5	5,06	4,56	455,61
		6	1,48	1,33	132,79
	2.3	7	4,43	3,99	398,81
		8	2,11	1,90	189,59
3	3.1	9	0,92	0,83	82,62
		10	1,62	1,46	145,70
		11	3,79	3,41	340,90
	3.2	12	0,92	0,83	82,62
		13	1,48	1,33	132,79
		14	3,64	3,28	327,62
	3.3	15	0,92	0,83	82,62
		16	1,86	1,67	167,46
		17	3,26	2,94	293,69
4	4.1	18	0,92	0,83	82,62
		19	1,20	1,08	108,44
		20	3,24	2,91	291,48
		21	1,30	1,17	116,56
	4.2	22	0,92	0,83	82,62
		23	0,87	0,78	78,20
		24	3,24	2,91	291,48
		25	1,02	0,91	91,48

#### 4.2.5 Resultados da otimização

A Tabela 4.9 apresenta os cenários ideais de acordo com o número mínimo de veículos. Dora-vante os cenários serão definidos por rota, ou seja, a “Rota 1” consistirá no cenário 1.1 (formada por uma rota e um veículo), a “Rota 2” consistirá no cenário 2.1 (formado por duas rotas e dois veículos) e assim consecutivamente.

Tabela 4.9: Cenário ideal para cada número de rotas.

$\mu$	Cenário
1	1.1
2	2.1
3	3.2
4	4.2

### 4.3 Simulação

Concluída a etapa da otimização de rotas, foi desenvolvido um modelo de simulação que agrupa todos os aspetos essenciais para a obtenção de resultados com o maior nível de confiança possível.

Definido o processo produtivo, as etapas e tempos de processamento são concebidos os quatro modelos de simulação que divergem entre si apenas nos cenários de rotas e respetivos números de veículos.

Os cinco planos de produção fornecidos pela empresa são simulados para cada cenário de rota, totalizando vinte simulações distintas.

Em virtude de se pretender analisar a sensibilidade do sistema em função de diferentes parâmetros (capacidade dos AGVs – 1, 3 ou 6 – e tempo de ciclo – 0, 10 ou 20 min), em cada simulação foram executadas as experiências definidas na Tabela 3.8 (página 45) e um total de 5 replicações para cada combinação de parâmetros. A simulação é realizada para um período de 60 dias.

Os seguintes capítulos apresentam resposta de saída de simulação a nível de *lead time* médio, WIP médio e máximo e *output* para os cinco diferentes planos de produção.

#### 4.3.1 Output máximo

De forma a estudar a influência das rotas e dos parâmetros no *output* final, os planos de produção foram simulados sem considerar o efeito do manuseamento dos materiais por parte dos AGVs (ver Tabela 4.10) e com uma cadência de entrada de 60 min/FOUP. Este procedimento foi descrito por Hoon Kong [42] que simulou a produção e, em seguida, adicionou a etapa do AMHS de modo a estudar o impacto que este criava no sistema.

A Tabela 4.11 apresenta o *output* máximo para cada plano de produção em 60 dias e a respetiva cadência de entrada, ou seja, o período de tempo entre cada lançamento de entidades no sistema.

Tabela 4.10: Parâmetros do AGV para obter o *output* máximo do sistema.

Parâmetro	Valor	Unidade
Velocidade AGV	200	m/s
Capacidade de carga	200	-
Tempo de <i>un-loading</i>	0	seg
Duração das baterias	10 000	hr
Tempo de carregamento das baterias	0	min

Estes resultados permitem analisar a capacidade do sistema e definir a cadência de entrada dos produtos na fábrica de forma a que o WIP se consiga manter estável, ou seja, é necessário igualar a taxa de entrada dos produtos ( $R_{in}$ ) com a taxa de saída ( $R_{out}$ ) (ver Figura 4.14).

Tabela 4.11: *Output* máximo para cada plano de produção e respetiva cadência de entrada.

Plano	<i>Output</i> em 60 dias	Cadência entrada (min/FOUP)
1	260	332
2	206	419
3	160	540
4	123	702
5	182	475

Figura 4.14: Caracterização do  $R_{in}$  e do  $R_{out}$  no sistema.

Obtido o *output* máximo e respetiva cadência de entrada foi possível estabilizar o WIP com padrão dente-de-serra cuja redução linear representa a taxa de saída dos produtos (ver Figura 4.15).

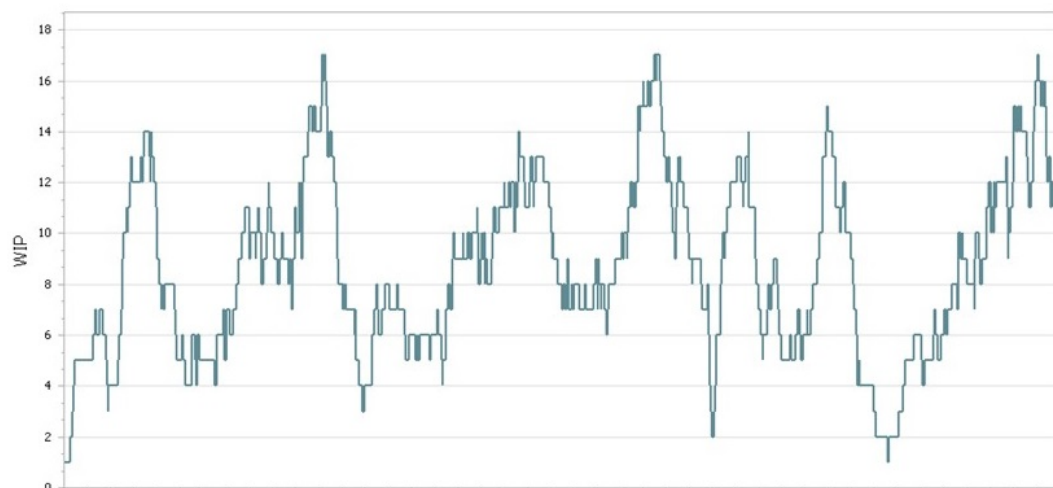


Figura 4.15: Evolução do WIP no sistema no plano 1 com cadência de entrada de 332 min/FOUP.

## 4.4 Resultados

As seguintes secções apresentam os principais resultados para os cinco planos de produção e uma análise de sensibilidade do sistema de acordo com variações na velocidade do AGV e tempo de *un-loading* no plano 1.

### 4.4.1 Plano de produção 1

A Figura 4.16 permite comparar o *output* máximo com os resultados do *output* de cada rota em função dos diferentes parâmetros de sensibilidade.

Em primeira análise, aumentar para 3 (ou mais) de capacidade permite que a influência do tempo de ciclo seja praticamente nula. Todavia, AGVs com capacidade 6 não oferecem melhores resultados em comparação com capacidade 3.

Aumentar o tempo de ciclo torna-se crítico quando se considera veículos com capacidade 1, ou seja, os ciclos de 20 min restringem o *output*, provocando, certamente, tempos de espera longos dos produtos nos *buffers* de saída.

O número de rotas tem relevância em situações de capacidade 1, sendo um veículo incapaz de suportar o sistema. Nas restantes situações (capacidade 3 e 6), aumentar o número de veículos pode não ser benéfico em consequência de provocar mais transições dos produtos entre veículos, logo, pode ser prejudicial para o sistema. No entanto, a situação que se sobressai seria a utilização de dois veículos (Rota 2) com capacidade 3 e tempo de ciclo de 0 min.

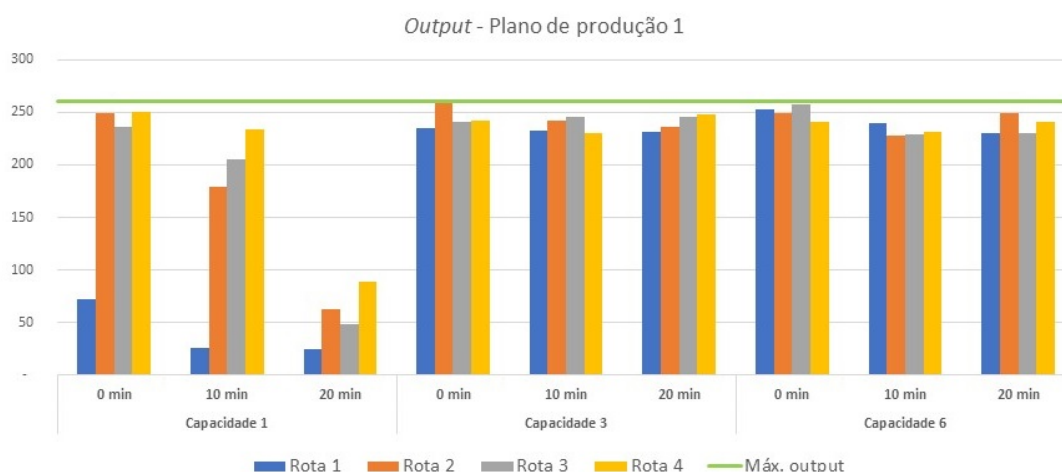


Figura 4.16: *Output* do plano de produção 1.

A Figura 4.17 demonstra o impacto no WIP médio no sistema e a Figura 4.18 o *lead time* médio dos produtos. Tal como expectável, os gráficos são caracterizados pelo inverso do gráfico

*output*, ou seja, é previsível que cenários com menor *output* provoquem maior acumulação de produtos no sistema e aumentem o *lead time*.

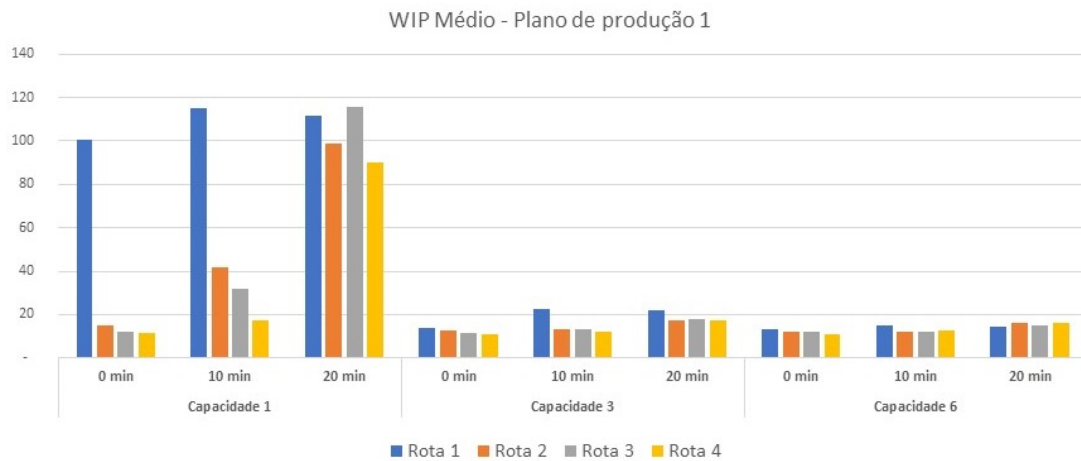


Figura 4.17: WIP médio do plano de produção 1.

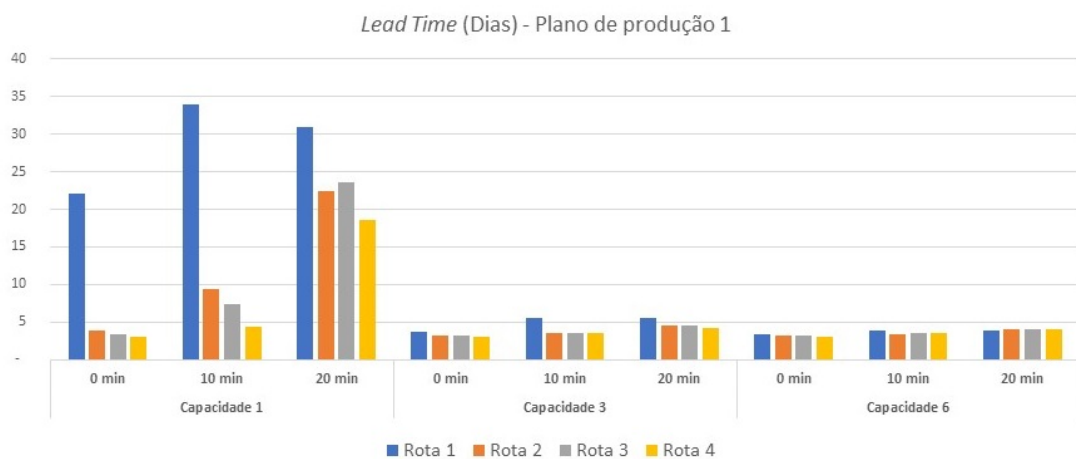


Figura 4.18: *Lead time* do plano de produção 1.

#### 4.4.2 Sensibilidade a diferentes parâmetros

As seguintes análises estudam o impacto de diferentes parâmetros do AGV no plano de produção 1, nomeadamente, ao diminuir a velocidade do AGV para 0,5 m/s (ver Figura 4.19) e, em seguida, aumentar o tempo de *un-loading* para o dobro, ou seja, 50 seg (ver Figura 4.20).

O sistema não se demonstra significativamente sensível a alterações na velocidade do veículo nem ao tempo de carregamento e descarregamento dos produtos. A maior variação ocorre ao diminuir a velocidade do veículo na Rota 1, capacidade 1 e tempo de ciclo 0 min que diminui para praticamente metade o seu *output*, mas definitivamente nunca seria uma escolha interessante a implementar.

Efetivamente, variações nos parâmetros dos veículos não causam efeitos consideráveis no sistema produtivo, em virtude de os produtos estarem maioritariamente em produção ou em filas de espera, isto é, após um produto finalizar os processos numa determinada zona este é depositado no *buffer* de saída, mas simultaneamente a zona retorna os seus processos com produtos que se encontram em fila de espera de entrada. O produto finalizado é transportado para uma diferente zona onde, certamente, irá aguardar numa diferente fila de espera para ser produzido.

Em suma, as zonas de produção não se encontram totalmente dependentes dos transportes de materiais uma vez que os seus *buffers* de entrada têm *stock* suficiente para continuar a produção e os tempos de processamento são muito superiores aos tempos de deslocação dos materiais.

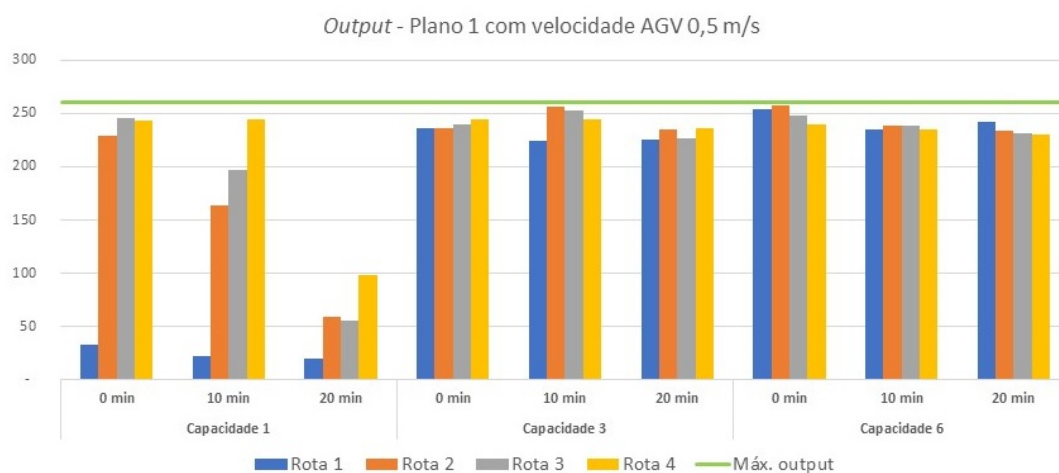


Figura 4.19: *Output* do plano de produção 1 com velocidade 0,5 m/s.

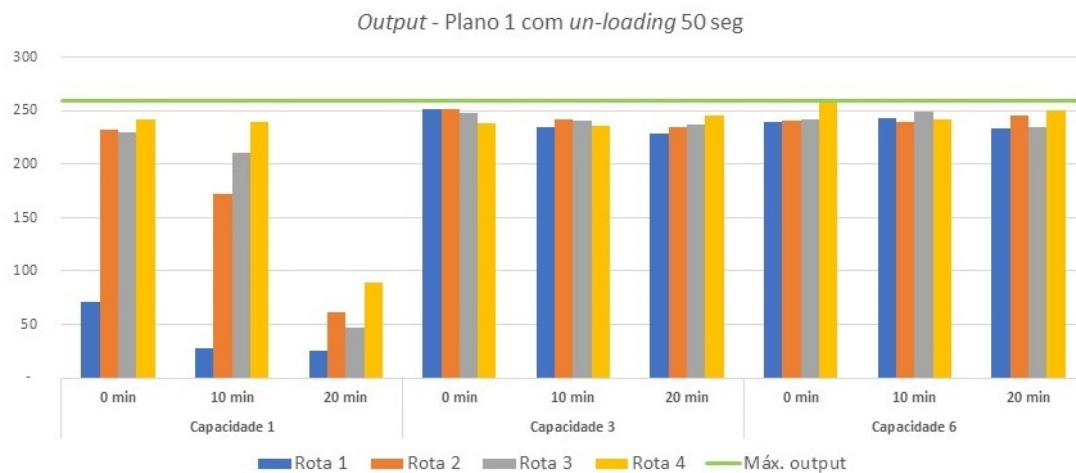


Figura 4.20: *Output* do plano de produção 1 com tempo de *un-loading* de 50 segundos.

#### 4.4.3 Plano de produção 2, 3, 4 e 5

As Figuras 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24 representam os *outputs* das diferentes rotas e diferentes parâmetros respetivamente nos planos de produção 2, 5, 3 e 4, ou seja, em ordem decrescente do *output* máximo (ver Tabela 4.11 - página 63).

Sendo que o plano 1 obteve o maior *output* máximo e, a aplicação de veículos com capacidade 6 não resultou em melhorias significativas em relação à capacidade 3, a análise da capacidade 6 é descartada nos seguintes gráficos.

De igual resultado com o plano 1, a utilização de veículos com capacidade 3 mantém-se o cenário mais interessante na medida em que, de um modo geral, os resultados aproximam-se da capacidade máxima de produção da fábrica.

A utilização de veículos com capacidade 1 pode não ser sustentável. Agregando a este fator a utilização de apenas um veículo (Rota 1), o sistema obteve os piores resultados nos respetivos cenários.

Todavia, à medida que o *output* máximo decresce, o impacto da utilização de veículos com capacidade 1 é atenuado. Do mesmo modo, o tempo de ciclo revela-se cada vez menos preponderante em virtude dos processos se tornarem mais lentos.

Importa salientar que, em processos mais lentos, a utilização de veículos com maior capacidade, mas com maior tempo de ciclo, pode não oferecer melhores resultados em comparação com veículos de menor capacidade e tempo de ciclo de 0 min. Tomemos como exemplo o plano de produção 3 (ver Figura 4.23 - página 69), no qual se observa melhores resultados com capacidade 1 e tempo de ciclo 0 min (excetuando a Rota 1), em comparação com os valores obtidos para a capacidade 3 com tempo de ciclo 10 e 20 min.

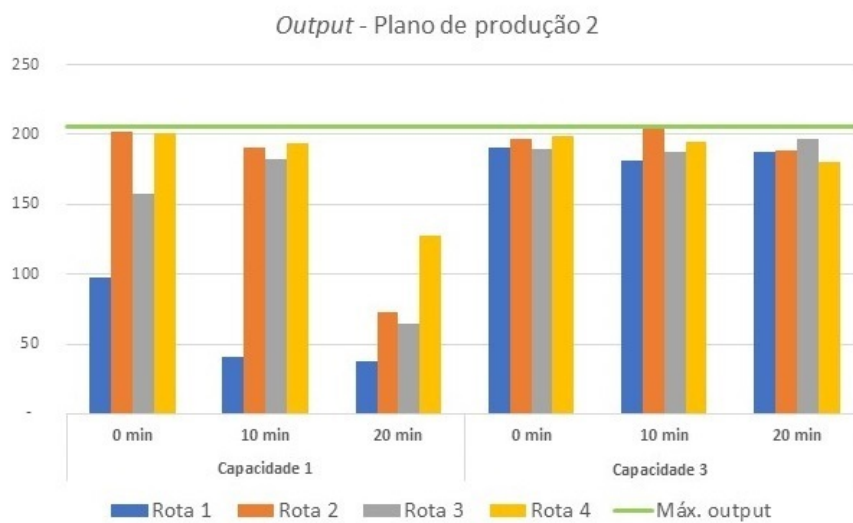


Figura 4.21: *Output* do plano de produção 2.

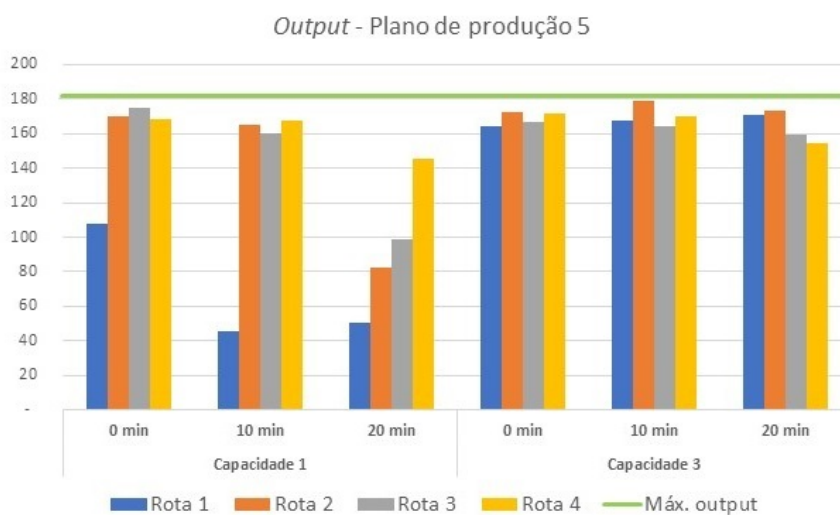
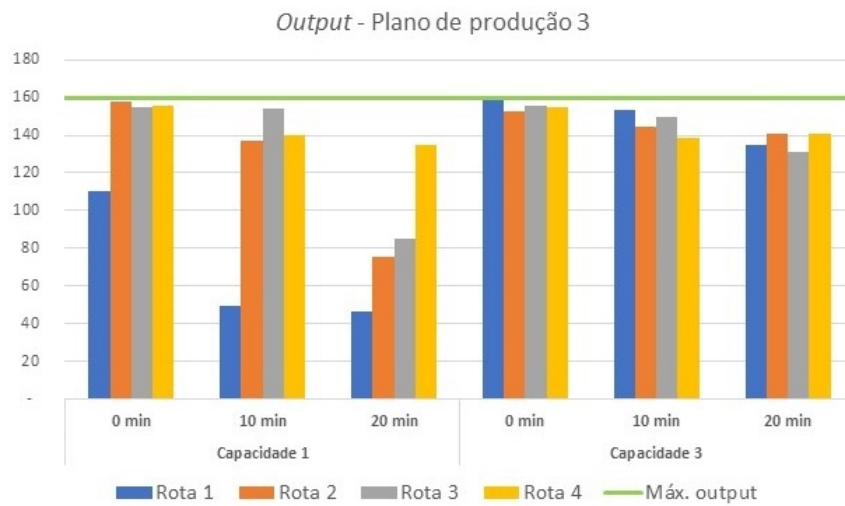
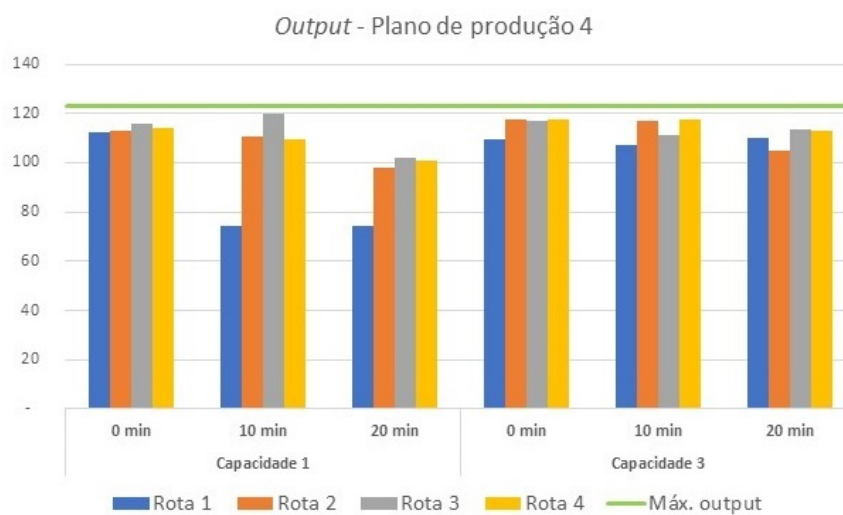


Figura 4.22: *Output* do plano de produção 5.



Figura 4.23: *Output* do plano de produção 3.Figura 4.24: *Output* do plano de produção 4.

## 4.5 Dashboards

O SIMIO confere a possibilidade de analisar os resultados através de *dashboards*. As seguintes análises comparam dois cenários com resultados interessantes no plano de produção 1:

- **A** — Rota 2: Capacidade 3 e tempo de ciclo 0 min;
- **B** — Rota 4: Capacidade 1 e tempo de ciclo 0 min.

A escolha destes cenários permite estudar o impacto entre a utilização de menos veículos (Rota 2) com mais capacidade em contraste com mais veículos (Rota 4) e menor capacidade de transporte.

### 4.5.1 Lead time

As Figuras 4.25 e 4.26 apresentam a distribuição do *lead time* médio de cada produto no plano de produção 1 segundo a análise A e B.

Em A, o tempo médio para a produção de um produto são 3,23 dias em contraste com os 3,09 dias de B.

No que diz respeito aos tempos de produção, a utilização de 4 veículos em comparação com 2 apresenta uma redução de 4,33%.

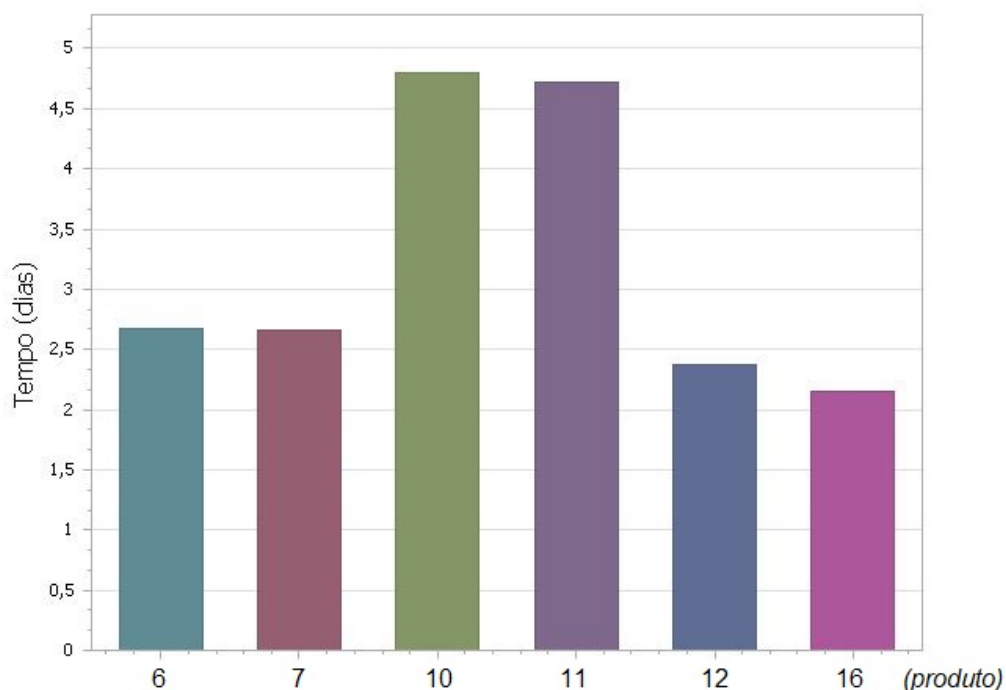


Figura 4.25: *Lead time* dos produtos no plano 1, Rota 2, capacidade 3 e 0 min tempo de ciclo.

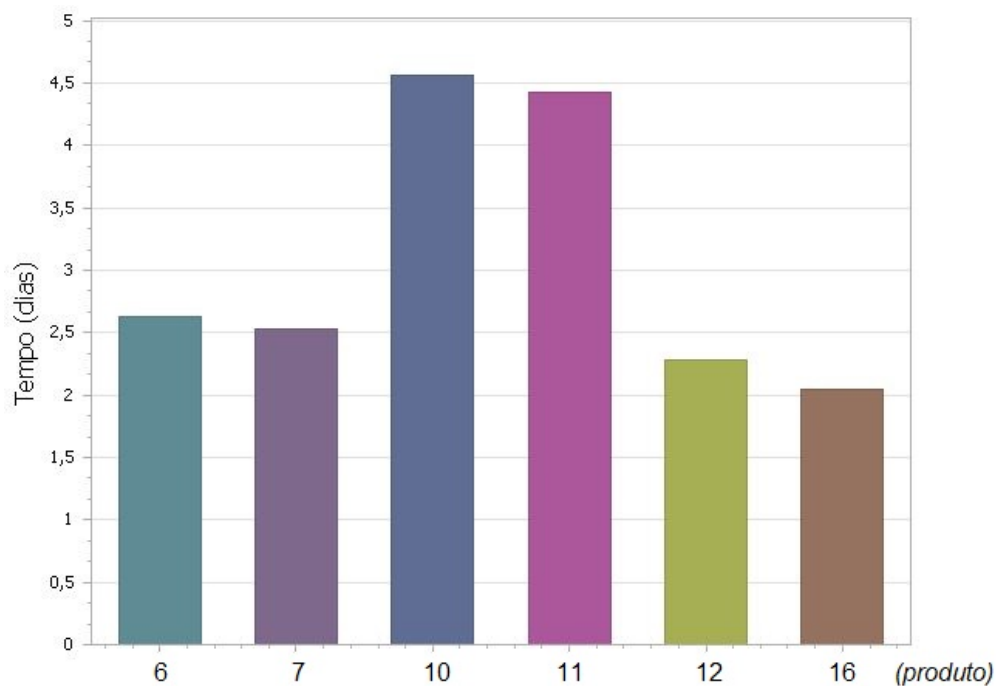


Figura 4.26: *Lead time* dos produtos no plano 1, Rota 4, capacidade 1 e 0 min tempo de ciclo.

#### 4.5.2 WIP Global

As Figuras 4.27 e 4.28 apresentam a evolução do WIP no sistema nas análises A e B, respectivamente. Assim, sempre que um produto é criado na *Source* o contador é incrementado e, após expedido no *Shipping Area*, é decrementado. Daí, a redução linear corresponder à taxa de saída dos produtos.

Em A, o WIP máximo atingiu o valor de 23 produtos com 13 de média e em B o valor máximo foi 21 com 12 de média. Estes valores foram obtidos após os resultados médios das 5 replicações sendo que as seguintes Figuras apresentam o resultado de apenas uma replicação.

A aplicação de 4 veículos permite manter sensivelmente níveis inferiores de WIP. Contudo, a diferença destes resultados pode não ser significativa para optar por 4 veículos ao em vez de 2.

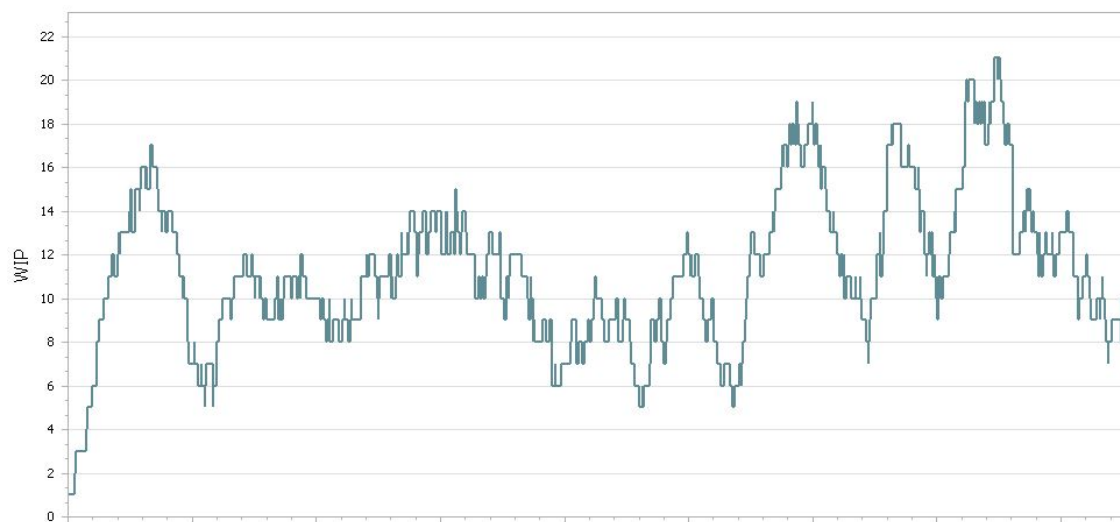


Figura 4.27: WIP dos produtos no plano 1, Rota 2, capacidade 3 e 0 min tempo de ciclo.

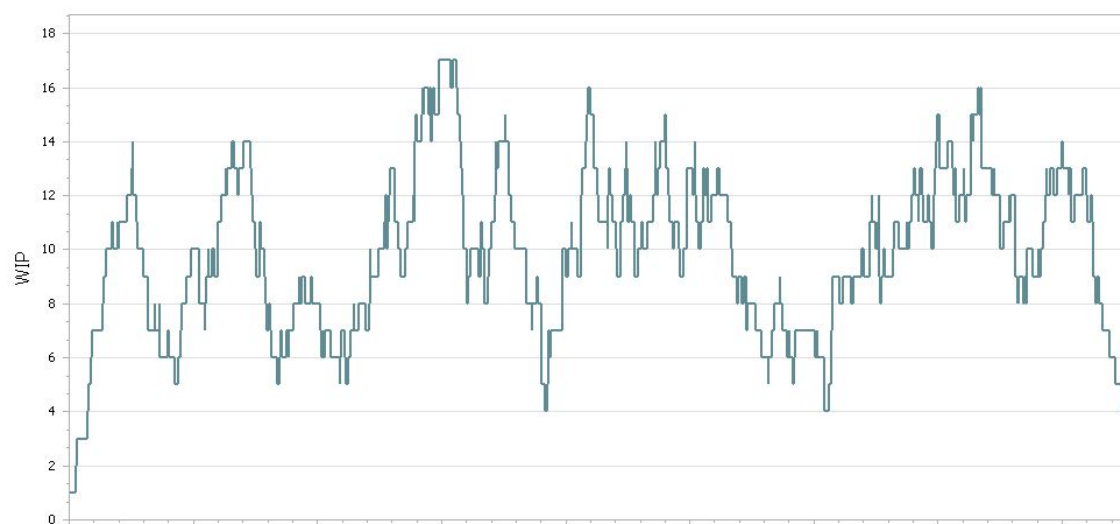


Figura 4.28: WIP dos produtos no plano 1, Rota 4, capacidade 1 e 0 min tempo de ciclo.

### 4.5.3 Taxa de utilização dos veículos

As seguintes Figuras 4.29 e 4.30 apresentam as taxas de utilização dos veículos em função dos seus estados.

No que diz respeito à percentagem de tempo em carregamento (*Charging*) os valores não se demonstram muito discrepantes, contudo, e tal como expectável, a taxa de transporte (*Transporting*) dos veículos na Rota 2 é bastante superior aos da Rota 4. Em virtude dos recursos disponíveis, isto é, o número de veículos ser menor, confere-lhes uma maior taxa de utilização.

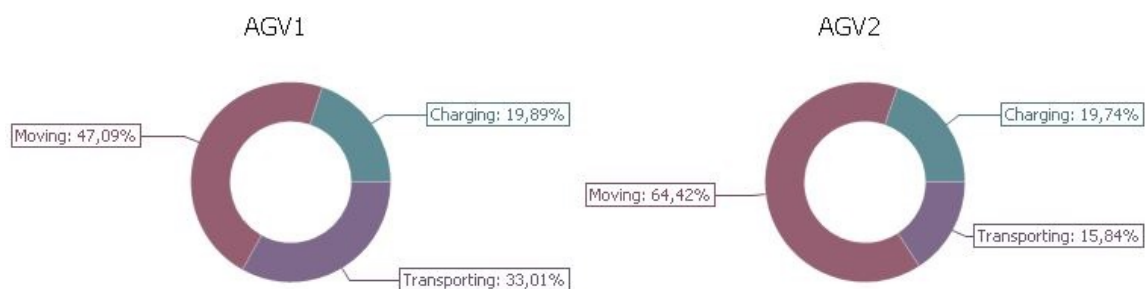


Figura 4.29: Taxa de utilização dos AGVs no plano 1, Rota 2, capacidade 3 e 0 min tempo de ciclo.



Figura 4.30: Taxa de utilização dos AGVs no plano 1, Rota 4, capacidade 1 e 0 min tempo de ciclo.



## Capítulo 5

# Conclusões e Trabalho Futuro

Este capítulo complementar as considerações finais da dissertação no qual são descritas as principais conclusões e, em seguida, são sugeridas propostas de trabalho adicionais que poderiam ser realizadas no futuro com vista à melhoria e otimização dos módulos desenvolvidos.

### 5.1 Contribuições

O objetivo principal da dissertação consistiu em desenvolver uma abordagem híbrida de otimização e simulação, para conceber rotas de distribuição baseadas no conceito de transporte *milk run* numa empresa de semicondutores.

Relativamente ao conceito *milk run*, os VRP nas plantas de fábrica são similares aos VRP clássicos entre instalações, no entanto, continuam a existir diferenças que impedem a aplicação do modelo *milk run* num ambiente interno de produção com métodos de logística *in-bound* e *out-bound*. Desse modo, a aplicação interna de um sistema de distribuição *milk run* deve ser individualizada tendo em consideração as restrições físicas do *layout*, pontos de *stock*, diversidade e características dos produtos. Contudo, a abordagem *milk run* providencia inúmeras vantagens em comparação ao método de distribuição *point-to-point* e, agregando a utilização de um AMHS, o transporte de materiais é assegurado com maior nível de segurança e entregas JIT.

Desse modo, a investigação iniciou-se com o desenvolvimento de um modelo matemático com o objetivo de minimizar os custos associados ao investimento e utilização dos AGVs. No entanto, foi necessário definir previamente critérios heurísticos para a definição de possíveis cenários de rotas. Através da plataforma de otimização CPLEX, foram obtidos os quatro melhores cenários em função do número mínimo de veículos. Em média, o tempo de execução do programa demorou aproximadamente 8 segundos.

A simulação foi concebida em forma faseada, sendo cada fase de desenvolvimento implementada e testada cuidadosamente, de forma a garantir com rigor que o processo fosse retratado com o maior nível de detalhe. O sistema de produção de uma empresa de semicondutores é caracterizado pela sua filosofia *job shop*, ou seja, não existe um fluxo contínuo das sequências de produção. Os

tempos de processamento divergem entre produto, máquinas e etapas, daí os tempos de processamento não serem característicos dos equipamentos, mas sim do produto e respetiva etapa. No entanto, a simulação permitiu que a sequência de produção fosse retratada de acordo com a sequência real e os AGVs fossem responsáveis pela total distribuição dos produtos.

O modelo de otimização e simulação incorporou duas zonas da fábrica que não integram o processo produtivo, no entanto, continuaram a ser consideradas permitindo futuras adaptações no *layout* atual. Apesar de a dissertação ser baseada num caso real específico, o modelo matemático de otimização de rotas pode ser implementado na maioria dos sistemas de produção.

A nível de resultados, foi possível analisar o impacto do número de veículos e respetivas características em planos de produção divergentes. Em planos de produção mais rápidos, ou seja, através de produtos com menores tempo de processamento, a necessidade de mais veículos é maior. Contudo, é possível contornar o investimento de mais veículos com a adaptação de veículos com melhores características, especialmente a nível de capacidade de carga.

Em suma, quanto mais lento for o processo menor será a necessidade de veículos. A necessidade de veículos com maior capacidade e menor tempo de ciclo também é atenuada.

Através dos resultados é importante realçar:

- Mais veículos podem prejudicar o sistema uma vez que existe um maior número de transferências entre as rotas;
- Veículos com menor capacidade de carga podem desencadear melhores resultados se implementados com menor tempo de ciclo.

A taxa de utilização dos veículos é um aspeto importante a ter em consideração. Tomemos como exemplo o AGV1 da Rota 4 (Figura 4.30 – página 73) que acrescenta valor ao processo produtivo em apenas 4,46% do seu tempo de funcionamento, ou seja, contraria a filosofia TPS e irá percorrer “rotas vazias” sem transportar materiais. A empresa necessita refletir sobre o impacto do investimento em equipamentos com pouca taxa de utilização.

O *lead time* médio obtido obteve valores bastante inferiores aos tempos médios fornecidos pela empresa. Esse fator é consequência de não serem considerados os manuseamentos e filas de espera internos em cada zona. Alguns autores consideram mesmo que 85% do tempo total que um produto demora a atravessar um seja dedicado ao seu transporte ou à espera do mesmo [19, 20].

Concluindo, o objetivo principal da dissertação foi assim cumprido. As rotas *milk run* foram otimizadas tendo em consideração a redução de custos e, em seguida, o processo produtivo foi simulado permitindo a análise de diversos fatores de sensibilidade. No geral, a abordagem proposta demonstrou o seu potencial como uma ferramenta para orientar os esforços de melhoria numa empresa de produção de semicondutores.



## 5.2 Trabalho Futuro

Em virtude de não serem simulados todos os equipamentos individualmente, mas sim em aglomerado, que correspondem a uma zona, a análise do cálculo da capacidade de cada zona tornou-se robusta e os seus valores podiam ser alvo de melhorias. A aplicação da mediana para cálculo do tempo de processamento da zona tem em vista impedir que distribuições numéricas distorcidas influenciem drasticamente o resultado final. Desse modo, o foco de trabalho futuro consistirá numa simulação total dos 84 equipamentos.

Outra importante melhoria, relativamente à otimização, prende-se pela possível análise da procura em cada ponto de *stock* e do controlo da capacidade dos veículos. Nesta situação, o modelo matemático não analisava apenas as rotas e respetivas distâncias, mas também, os fluxos dos materiais, necessidades de produção e capacidades de transporte dos AGVs. Um estudo aprofundado sobre a procura nas diferentes zonas permitiria uma melhor distribuição dos veículos ao longo do *layout*. Esta abordagem certamente aumentaria a taxa de utilização dos veículos que seriam dispostos em função das necessidades de transporte.

Relativamente à simulação, a próxima etapa seria implementar os planos de produção através de um planeamento com variação dos planos ao longo das semanas. Esta abordagem permite também modelar situações em que a capacidade de um centro de trabalho ou carga no sistema possa variar ao longo do tempo.



# Referências

- [1] Toyota. Toyota Production System. URL: [http://www.toyota-global.com/company/vision\\_philosophy/toyota\\_production\\_system/](http://www.toyota-global.com/company/vision_philosophy/toyota_production_system/).
- [2] AllAboutLean. The (True) Difference Between Push and Pull, 2015. URL: <https://www.allaboutlean.com/push-pull/>.
- [3] N.R. Sanders. *The Definitive Guide to Manufacturing and Service Operations: Master the Strategies and Tactics for Planning, Organizing, and Managing How Products and Services Are Produced*. Council of Supply Chain Management Professionals. Pearson Education, 2013.
- [4] William J Stevenson e Mehran Hojati. *Operations management*, volume 8. McGraw-Hill/Irwin Boston, 2007.
- [5] Michel Baudin. *Lean logistics: The nuts and bolts of delivering materials and goods*. Productivity Press, 2005.
- [6] J. Nomura e S. Takakuwa. Optimization of a number of containers for assembly lines: The fixed-course pick-up system. *International Journal of Simulation Modelling*, 5(4):155–166, 2006. doi:10.2507/IJSIMM05(4)3.066.
- [7] Huseyin Selcuk Kilic, M. Bulent Durmusoglu, e Murat Baskak. Classification and modeling for in-plant milk-run distribution systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62(9-12):1135–1146, 2012. doi:10.1007/s00170-011-3875-4.
- [8] Alvin C Bruska, Timbur M Wulf, e Jennifer K Robinson. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference P. A . Farrington, H. Current, páginas 843–849, 1998.
- [9] José António Faria. "Continuous Improvement - Kaizen"[material to support course of Quality Management . MIEEC - FEUP], 2017.
- [10] Deloitte. The future of manufacturing, 2015. URL: <https://www2.deloitte.com/insights/us/en/industry/manufacturing/future-of-manufacturing-industry.html>.
- [11] N. Hari Prasad, G. Rajyalakshmi, e A. Sreenivasulu Reddy. A typical manufacturing plant layout design using CRAFT algorithm. *Procedia Engineering*, 97:1808–1814, 2014. doi:10.1016/j.proeng.2014.12.334.
- [12] Taiichi Ohno. *Toyota Production System - Beyond Large-Scale Production*. Productivity Press, Portland, Oregon, 1988.

- [13] R.J Gaskins e J.M.A Tanchoco. Flow Path Design for Automated Guided Vehicle Systems, 1987.
- [14] Anne Meyer. Milk Run Design : Definitions , Concepts and Solution. (February), 2015. doi:10.5445/IR/1000051064.
- [15] Barómetro EY. A importância da robótica para as empresas industriais, 2017. URL: <http://www.jornaleconomico.sapo.pt/noticias/a-importancia-da-robotica-para-as-empresas-industriais-231144>.
- [16] Jason Chavis. The Importance of Robots, 2016. URL: <https://www.techwalla.com/articles/the-importance-of-robots>.
- [17] Rick Schneider. Robotic Automation Can Cut Costs Investment in automation can enable US manufacturers to increase productivity and defeat offshore. *Manufacturing Engineering magazine*, (1):1–3, 2005.
- [18] Nirmal Govind, Theresa M. Roeder, e Lee W. Schruben. A simulation-based closed queueing network approximation of semiconductor automated material handling systems. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 24(1):5–13, 2011. doi:10.1109/TSM.2010.2089659.
- [19] Jerry Banks, Barry L. Nelson, David M. Nicol, e John S. Carson. *Discrete-Event System Simulation*. Pearson, 5 edição, 2009.
- [20] Harrell Charles, Biman Ghosh, e Royce Bowden. Modeling Material Handling Systems. Em *Simulation Using ProModel*, chapter 13, páginas 335–356. 2004.
- [21] Byung-In Kim, Sangwon Jeong, Jaejoon Shin, Jeongin Koo, Junjae Chae, e Sujeong Lee. A layout- and data-driven generic simulation model for semiconductor fabs. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 22(2):225–231, may 2009. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/TSM.2009.2017624>, doi:10.1109/TSM.2009.2017624.
- [22] Peter Hines. Toyota Production System in House Building, 2012. URL: <http://sapartners.com/wp-content/uploads/2012/08/Toyota-Production-System-in-House-Building1.pdf>.
- [23] A. Courtnois, C. Martin-Bonnefois, e M. Pillet. *Gestão da Produção*. Lisboa, 1997.
- [24] P. Dennis. *Lean Production Simplified, Second Edition: A Plain-Language Guide to the World's Most Powerful Production System*. 2 edição, 2007.
- [25] S. P. Tayal. Just In Time Manufacturing. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2012.
- [26] Junghoon Kim, Gwangjae Yu, e Young Jae Jang. Semiconductor FAB layout design analysis with 300-mm FAB data: “Is minimum distance-based layout design best for semiconductor FAB design?”. *Computers and Industrial Engineering*, 99:330–346, 2016. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2016.02.012>, doi:10.1016/j.cie.2016.02.012.
- [27] Neal G. Pierce e Richard Stafford. Simulation AMHS performance for semiconductor wafer fabrication. *International Symposium on Semiconductor Manufacturing*, páginas 165–170, 1995.

- [28] Rui Lopes dos Reis. *Manual de Logística - Teoria e Prática*. Lisboa, 1ª edição edição, 2017.
- [29] Andreas Fink, Armin Fügenschuh, e Martin Josef Geiger. *Operations Research Proceedings 2016*. Springer International Publishing AG, Hamburg, 2016.
- [30] Hidetaka Ichikawa. Simulating an Applied Model To Optimize Cell Production and Parts Supply (Mizusumashi) for Laptop Assembly. páginas 2272–2280, 2009.
- [31] C. Harrell, B.K. Ghosh, e R. Bowden. *Simulation Using ProModel*. McGraw-Hill series in industrial engineering and management science. McGraw-Hill/Higher Education, 2004.
- [32] Dematic. Automatic Guided Vehicles (AGVs). URL: [http://www.egemin-automation.com/en/automation/material-handling-automation{\\_}ha-solutions/agv-systems](http://www.egemin-automation.com/en/automation/material-handling-automation{_}ha-solutions/agv-systems).
- [33] Srinivasan Rajagopalan e Sunderesh S Heragu. Advances in discrete material handling system design. *Sadhana*, 22(2):281–292, apr 1997. URL: <http://link.springer.com/10.1007/BF02744493>, doi:10.1007/BF02744493.
- [34] David Sinriech e Edouard Samakh. A genetic approach to the pickup/delivery station location problem in segmented flow based material handling systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 18(2):81–99, jan 1999. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0278612599800144>, doi:10.1016/S0278-6125(99)80014-4.
- [35] Heung-Suk Hwang. Heuristic transporter routing model for manufacturing facility design. *Computers & Industrial Engineering*, 46(2):243–251, apr 2004. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360835203001232>, doi:10.1016/j.cie.2003.12.021.
- [36] Rosario Domingo, Roberto Alvarez, Marta Melodía Peña, e Roque Calvo. Materials flow improvement in a lean assembly line: a case study. *Assembly Automation*, 27(2):141–147, 2007. URL: <http://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/01445150710733379>, doi:10.1108/01445150710733379.
- [37] Sule Itir Satoglu e I. Ethem Sahin. Design of a just-in-time periodic material supply system for the assembly lines and an application in electronics industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65(1-4):319–332, mar 2013. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-012-4171-7>, doi:10.1007/s00170-012-4171-7.
- [38] Ashkan Negahban e Jeffrey S. Smith. Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(2):241–261, 2014. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.12.007>, doi:10.1016/j.jmsy.2013.12.007.
- [39] Che Fu Hsueh. A simulation study of a bi-directional load-exchangeable automated guided vehicle system. *Computers and Industrial Engineering*, 58(4):594–601, 2010. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2009.12.008>, doi:10.1016/j.cie.2009.12.008.
- [40] Pyung-Hoi Koo e Jaejin Jang. Vehicle Travel Time Models for AGV Systems under Various Dispatching Rules. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 2002.
- [41] Jesus A. Jimenez, Gerald T. Mackulak, e John W. Fowler. Levels of capacity and material handling system modeling for factory integration decision making in semiconductor

- wafer fabs. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 21(4):600–613, 2008. doi:10.1109/TSM.2008.2005368.
- [42] Sang Hoon Kong. Two-step simulation method for automatic material handling system of semiconductor fab. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23(4):409–420, 2007. doi:10.1016/j.rcim.2006.05.004.
- [43] Jean-etienne Kiba, Gilles Lamiable, Jean Monnet, e Claude Yugma. Simulation of a Full 300Mm Semiconductor Manufacturing Plant With Material Handling Constraints. páginas 1601–1609, 2009.
- [44] Jeffrey S. Smith. Survey on the use of simulation for manufacturing system design and operation. *Journal of Manufacturing Systems*, 22(2):157–171, 2003. doi:10.1016/S0278-6125(03)90013-6.
- [45] Michael C. Fu. Optimization for simulation: Theory vs. practice. *INFORMS Journal on Computing*, 14(3):192–215, 2002. URL: <http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/ijoc.14.3.192.113>, doi:10.1287/ijoc.14.3.192.113.
- [46] MiR100. URL: <http://www.mobile-industrial-robots.com/en/products/mir100/>.